



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GISELE GIMENES BROCHINI

BIODETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L.) SUBMETIDA
AO ATAQUE DE FUNGOS LIGNOCELULOLÍTICOS

CURITIBA

2019

GISELE GIMENES BROCHINI

BIODETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L.) SUBMETIDA
AO ATAQUE DE FUNGOS LIGNOCELULOLÍTICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Florestal na Área de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha
Coorientadores: Prof. Dr. Celso Garcia Auer
Profa. Dra. Mayara Elita Braz Carneiro

CURITIBA

2019

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Brochini, Gisele Gimenes

Biodeterioração de madeira de teca (*Tectona grandis* L.) submetida
ao ataque de fungos lignocelulolíticos / Gisele Gimenes Brochini. –
Curitiba, 2019.

115 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Pereira da Rocha

Coorientadores: Prof. Dr. Celso Garcia Auer

Profa. Dra. Mayara Elita Braz Carneiro

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. Defesa: Curitiba, 24/05/2019.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Fungos. 2. Fungos apodrecedores da madeira. 3. Teca (Árvore). 4.
Madeira - Biodegradação. 5. Madeira - Deterioração. 6. Teses. I. Rocha,
Márcio Pereira da. II. Auer, Celso Garcia. III. Carneiro, Mayara Elita
Braz. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias.
V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.443

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de GISELE GIMENES BROCHINI intitulada: BIODETERIORAÇÃO DA MADEIRA DE TECA (*Tectona grandis* L.) SUBMETIDA AO ATAQUE DE FUNGOS LIGNOCELULOLÍTICOS, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua


APROVAÇÃO


no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Maio de 2019.


MÁRCIO PEREIRA DA ROCHA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


CRISTIANE VIEIRA HELM
Avaliador Externo (EMBRAPA)


ALAN SLIATO DE ANDRADE
Avaliador Externo (UFPR)



Para meus pais: Tânia Maria Gimenes Brochini, José Carlos Brochini, meu irmão: Lucas Gimenes Brochini, meus avós: Zuleika dos Santos Gimenes (*in memoriam*), João Jimenes (*in memoriam*), Élide Surian Brochini (*in memoriam*), Azil Brochini (*in memoriam*) e meus tios: Zilma Gonçalves dos Santos, Zenaide dos Santos Napoli e Zoilo dos Santos (*in memoriam*), dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Orientador, Professor Dr. Márcio Pereira da Rocha e aos meus Coorientadores, Dr. Celso Garcia Auer e Professora Dra. Mayara Elita Braz Carneiro, pela amizade, por todos os conhecimentos compartilhados e pela confiança.

Ao Professor Dr. Dimas Agostinho da Silva e Professor Dr. Rui André Maggi dos Anjos pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Umberto Klock e ao Professor Dr. Alan Sulato de Andrade por toda a ajuda com as análises químicas e à Professora Dra. Silvana Nisgoski pela ajuda com as imagens. Agradeço também por todas as dicas, ensinamentos, companheirismo e paciência.

Ao Professor Dr. João Carlos Moreschi por todos os conhecimentos compartilhados.

Ao Senhor Ademir José Cavalli, pela ajuda com a confecção dos corpos de prova e por todos os momentos de descontração compartilhados.

Ao Professor Dr. Juarez Benigno Paes e à Dra. Luciana Ferreira da Silva pela doação e ajuda com os fungos utilizados neste trabalho.

Aos amigos que me ajudaram neste trabalho: Ana Paula Namikata, Claudio Gumane Juizo, David Milsted, Eliane Lopes da Silva, Eraldo Bonfatti Jr., Mauro Vitor Greco Távora, Morgana Cristina França e Pedro Licio Loiola. Sem vocês este trabalho não existiria.

Aos alunos e amigos do Laboratório de Biodegradação e Preservação da Madeira.

A todos os amigos e colegas do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal.

Aos amigos que a vida me presenteou e que, seja com abraços, conversas, pensamentos e orações estiveram sempre comigo: Adriana Antico, Alexandre Tadeu da Silva Alves, Angélica Tetília Baggio, Andréa Antico Soares, Darlene Gonçalves, Dionéia Romero Calixto, Márcia Andréa Firmino Vaz (*In memoriam*), Rafael Pereira Brito.

*“...I remember when
I swore I knew everything
Let's say knowledge is a tree
It's growing up just like me...”*

Pearl Jam

RESUMO

Diante da necessidade da utilização de recursos renováveis nas áreas de tecnologia e de materiais, a madeira se destaca por ser um produto versátil, reutilizável e biodegradável. O estudo da biodeterioração da madeira possui grande importância para o desenvolvimento de produtos preservantes menos nocivos ao meio ambiente e à saúde humana, assim como também para aplicações em processos biotecnológicos. A madeira de teca (*Tectona grandis* L.) apresenta elevada resistência mecânica e estabilidade dimensional, porém, possui como principal característica sua elevada durabilidade natural por possuir em seus extrativos compostos antimicrobianos e repelentes. Este estudo objetivou caracterizar a biodeterioração da madeira de teca através de ensaios de resistência natural acelerada em laboratório, submetendo madeira de cerne e de alburno ao ataque de três fungos apodrecedores: *Trametes versicolor*, *Gloeophyllum trabeum* e *Postia placenta*. Análises químicas quantitativas (solubilidade em NaOH a 1%, teor de extrativos totais, lignina total, teor de holocelulose) e caracterização microscópica foram realizadas mensalmente. O ensaio de resistência natural acelerada em laboratório verificou que a madeira de cerne se apresentou altamente resistente a *T. versicolor* e *P. placenta* e resistente a *G. trabeum*. Com relação à madeira de alburno, esta mostrou ser resistente a *P. placenta* e moderadamente resistente a *T. versicolor* e *G. trabeum*. A química da biodeterioração da madeira ao longo do tempo revelou que todos os fungos testados apresentaram atividade hidrolítica. O fungo *P. placenta* revelou ser o fungo que mais degradou a holocelulose ao final do ensaio. O fungo *T. versicolor* apresentou comportamento seletivo. A microscopia eletrônica de varredura demonstrou invasão de hifas no interior dos vasos logo ao final do primeiro mês para todos os fungos. A madeira atacada por *T. versicolor* e *P. placenta* apresentou considerável deterioração da madeira de alburno a partir da segunda coleta, com total destruição de sua estrutura ao final do ensaio. *G. trabeum* promoveu sinais de deterioração apenas ao final da terceira coleta, porém, houve elevada deterioração ao final do ensaio.

Palavras-chave: *Tectona grandis*. Biodeterioração. Fungos basidiomicetos.

ABSTRACT

Faced to the need to use renewable resources in technology and material's areas, wood stands out as a versatile, renewable and biodegradable product. The biodegradation study of wood is of great importance for the development of preservatives less harmful to the environment and human health, as well as for applications in biotechnological processes. Teak wood (*Tectona grandis* L.) is a noble wood, with high mechanical resistance and dimensional stability, but its main characteristic is its high natural durability, because it has antimicrobial compounds and repellents in their extractives. This study aimed to characterize the teak wood biodegradation by accelerated laboratory tests of natural decay resistance, subjecting wood of heartwood and sapwood to the attack of three rotting fungi: *Trametes versicolor*, *Gloeophyllum trabeum* and *Postia placenta*. Quantitative chemical analyzes (solubility in 1% NaOH, total extractives content, total lignin content, holocellulose content) and microscopic characterization was verified every month. The accelerated laboratory tests of natural decay resistance demonstrated that the heartwood was highly resistant to *T. versicolor* and *P. placenta* and resistant to *G. trabeum*. Regarding sapwood, it was resistant to *P. placenta* and moderately resistant to *T. versicolor* and *G. trabeum*. All fungi tested showed hydrolytic activity. The fungus *T. versicolor* presented selective behavior. The fungus *P. placenta* was the fungus that most depleted holocellulose at the end of the test. Scanning electron microscopy demonstrated invasion of hyphae within the vessels at the end of the first month for all fungi. The sapwood wood attacked by *T. versicolor* and *P. placenta* presented considerable degradation from the second month, with total destruction of the wood structure at the end of the test. *G. trabeum* showed signs of degradation only at the end of the third month; however, there was high degradation at the end of the test.

Keywords: *Tectona grandis*. Biodeterioration. Basidiomycetes fungi.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	PLANTAÇÃO DE <i>Tectona grandis</i>	23
FIGURA 2 -	DETALHE DE MADEIRA SERRADA DE TECA.....	24
FIGURA 3 -	ULTRAESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA.....	25
FIGURA 4 -	DISPOSIÇÃO DOS CONSTITUINTES DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA.....	28
FIGURA 5 -	MOLÉCULA DE CELULOSE E SUAS LIGAÇÕES DE HIDROGÊNIO.....	29
FIGURA 6 -	ESTRUTURA DA HEMICELULOSE.....	30
FIGURA 7 -	UNIDADES AROMÁTICAS COMPONENTES DA LIGNINA.....	31
FIGURA 8 -	MODELO DE ESTRUTURAS DE LIGNINA EM FOLHOSAS E CONÍFERAS.....	32
FIGURA 9 -	COMPONENTES QUÍMICOS CONSTITUINTES DA MADEIRA..	34
FIGURA 10 -	MADEIRA DETERIORADA POR FUNGO DE PODRIDÃO BRANCA.....	37
FIGURA 11 -	BASIDIOCARPO DE <i>Trametes versicolor</i>	38
FIGURA 12 -	MADEIRA DETERIORADA POR FUNGO DE PODRIDÃO PARDA.....	39
FIGURA 13 -	BASIDIOCARPOS DE FUNGOS DE PODRIDÃO PARDA.....	40
FIGURA 14 -	PRINCIPAIS COMPOSTOS QUINÔNICOS PRESENTES EM MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> L.....	41
FIGURA 15 -	ETAPAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO PARA O FUNGO <i>Trametes versicolor</i>	46
FIGURA 16 -	FRASCOS COM CORPOS DE PROVA COBERTOS COM MICÉLIO AO FINAL DO ENSAIO BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	47
FIGURA 17 -	CORPO DE PROVA DE MADEIRA DE ALBURNO SUBMETIDO AO ATAQUE DO FUNGO <i>Gloeophyllum trabeum</i> AO FINAL DO ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	47
FIGURA 18 -	CORTES TANGENCIAS DE MADEIRA DE ALBURNO E CERNE DE <i>Tectona grandis</i> SEM DETERIORAÇÃO.....	59

FIGURA 19 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Trametes versicolor</i> APÓS 30 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	60
FIGURA 20 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Trametes versicolor</i> APÓS 60 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	61
FIGURA 21 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Trametes versicolor</i> APÓS 90 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	62
FIGURA 22 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Trametes versicolor</i> APÓS 120 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	59
FIGURA 23 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Gloeophyllum trabeum</i> APÓS 30 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	65
FIGURA 24 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Gloeophyllum trabeum</i> APÓS 60 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	66
FIGURA 25 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Gloeophyllum trabeum</i> APÓS 90 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	67
FIGURA 26 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Gloeophyllum trabeum</i> APÓS 120 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	68

FIGURA 27 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Postia placenta</i> APÓS 30 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	70
FIGURA 28 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Postia placenta</i> APÓS 60 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	71
FIGURA 29 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Postia placenta</i> APÓS 90 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	72
FIGURA 30 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> ATACADA POR <i>Postia placenta</i> APÓS 120 DIAS DE ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	73
GRÁFICO 1 - PERDA DE MASSA MÉDIA PARA MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> APÓS BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AOS FUNGOS <i>Trametes</i> <i>versicolor</i> , <i>Gloeophyllum trabeum</i> e <i>Postia placenta</i> POR 120 DIAS.....	54
GRÁFICO 2 - PERDA DE MASSA MÉDIA PARA MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> APÓS ENSAIO DE BIOBIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AOS FUNGOS <i>Trametes versicolor</i> , <i>Gloeophyllum trabeum</i> e <i>Postia placenta</i> POR 120 DIAS.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA A FUNGOS XILÓFAGOS DE ACORDO COM A NORMA ASTM D - 2017 (2005)	48
TABELA 2 -	CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO APÓS 120 DIAS DE ACORDO COM A NORMA ASTM D – 2017 (2005).....	57
TABELA 3 -	QUÍMICA DA MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE BIOBIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO <i>Trametes versicolor</i> , POR 120 DIAS.....	76
TABELA 4 -	QUÍMICA DA MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO <i>Trametes versicolor</i> , POR 120 DIAS.....	77
TABELA 5 -	QUÍMICA DA MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO <i>Gloeophyllum trabeum</i> , POR 120 DIAS.....	80
TABELA 6 -	QUÍMICA DA MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO <i>Gloeophyllum trabeum</i> , POR 120 DIAS.....	81
TABELA 7 -	QUÍMICA DA MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO <i>Postia placenta</i> , POR 120 DIAS.....	82
TABELA 8 -	QUÍMICA DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO <i>Postia placenta</i> , POR 120 DIAS.....	83

TABELA 9 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	84
TABELA 10 - ANOVA PARA PERDA DE MASSA DE MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	100
TABELA 11 - ANOVA PARA PERDA DE MASSA DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	101
TABELA 12 - ANOVA PARA MASSA RESIDUAL DE MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	101
TABELA 13 - ANOVA PARA MASSA RESIDUAL DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	102
TABELA 14 - PERDA DE MASSA PARA A MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> (%) EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	103
TABELA 15 - PERDA DE MASSA PARA A MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	104
TABELA 16 - MASSA RESIDUAL MÉDIA PARA A MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> (%) EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	105
TABELA 17 - MASSA RESIDUAL PARA A MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	106

TABELA 18 - DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA PERDA DE MASSA DE MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	107
TABELA 19- DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA MASSA RESIDUAL MÉDIA DE MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	108
TABELA 20 - ANOVA PARA SOLUBILIDADE EM NaOH 1% DE MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	109
TABELA 21 - ANOVA PARA SOLUBILIDADE EM NaOH 1% DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	110
TABELA 22 - ANOVA PARA O TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS DE MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	110
TABELA 23 - ANOVA PARA O TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	111
TABELA 24 - ANOVA PARA O TEOR DE LIGNINA TOTAL DE MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	111
TABELA 25 - ANOVA PARA O TEOR DE LIGNINA TOTAL DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	112

TABELA 26 - ANOVA PARA O TEOR DE HOLOCELULOSE DE MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	112
TABELA 27 - ANOVA PARA O TEOR DE HOLOCELULOSE DE MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	113
TABELA 28 - DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VAIRAÇÃO PARA PARÂMETROS QUÍMICOS REALIZADOS EM MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> SEM BIODETERIORAÇÃO.....	113
TABELA 29 - DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VAIRAÇÃO PARA PARÂMETROS QUÍMICOS REALIZADOS EM MADEIRA DE CERNE DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS.....	114
TABELA 30 - DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VAIRAÇÃO PARA PARÂMETROS QUÍMICOS REALIZADOS EM MADEIRA DE ALBURNO DE <i>Tectona grandis</i> EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS	115

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS.....	21
2.1	OBJETIVO GERAL.....	21
2.2	Objetivos específicos.....	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1	A MADEIRA DE TECA.....	22
3.2	ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA.....	24
3.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA.....	27
3.3.1	Celulose.....	28
3.3.2	Hemiceluloses.....	29
3.3.3	Holocelulose.....	30
3.3.4	Lignina.....	30
3.3.5	Extrativos.....	33
3.4	BIODETERIORAÇÃO DA MADEIRA POR FUNGOS.....	34
3.4.1	Podridão Branca.....	37
3.4.2	Podridão Parda.....	38
3.5	RESISTÊNCIA NATURAL DE MADEIRA DE TECA.....	40
3.6	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	42
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	43
4.1	SELEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	43
4.2	ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	43
4.2.1	Cultura dos fungos.....	43
4.2.2	Caracterização do solo para os frascos de incubação.....	44
4.2.3	Preparo dos frascos.....	44
4.2.4	Adição dos corpos de prova aos frascos.....	45
4.2.5	Incubação dos frascos em câmara climática.....	45
4.2.6	Cálculo da perda de massa e massa residual.....	48
4.3	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	49
4.4	ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA DE TECA.....	49
4.4.1	Preparo da amostra.....	50

4.4.2	Solubilidade em NaOH a 1%.....	50
4.4.3	Teor de extrativos totais.....	51
4.4.4	Lignina.....	51
4.4.5	Holocelulose.....	52
4.5	ANÁLISE DOS DADOS.....	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
5.1	ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO.....	54
5.1.1	Perda de massa para madeira de cerne e alburno de <i>Tectona grandis</i>	54
5.1.2	Resistência de madeira de teca de acordo com a Norma ASTM 2017 – 05.....	56
5.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	58
5.2.1	Madeira sem deterioração.....	58
5.2.2	<i>Trametes versicolor</i>	59
5.2.3	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	64
5.2.4	<i>Postia placenta</i>	69
5.3	QUÍMICA DA BIODETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE TECAS.....	75
5.3.1	<i>Trametes versicolor</i>	75
5.3.2	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	79
5.3.3	<i>Postia placenta</i>	81
6	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A - RESUMO DAS ANÁLISES DE DADOS PARA PERDA DE MASSA E MASSA RESIDUAL DE MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	100
	APÊNDICE B - RESUMO DAS ANÁLISES DE DADOS PARA QUÍMICA DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	109

1 INTRODUÇÃO

Diante das necessidades por produtos sustentáveis na área de tecnologia, a madeira se destaca por tratar-se de um material biodegradável, renovável e reutilizável. Além de sua vasta aplicabilidade na construção civil, seus produtos também são de fundamental importância na produção de papel, fabricação de móveis, utensílios e geração de energia.

O processo de biodeterioração da madeira por fungos é alvo de pesquisas devido à elevada utilização da mesma e de seus diversos constituintes, principalmente na construção civil, mostrando a necessidade de desenvolvimento de produtos preservantes eficazes e menos nocivos à saúde e ao meio ambiente. Além disso, tal processo possui grande valor em pesquisas biotecnológicas para diversas áreas da indústria. Os mecanismos enzimáticos e não enzimáticos produzidos pelos fungos lignocelulolíticos, embora não tenham sido totalmente elucidados, apresentam elevado potencial para a biotecnologia, como a degradação de compostos xenobióticos, produção de medicamentos, biorremediação de solos, biopolpação e biobranqueamento de polpas celulósicas.

Determinadas espécies de madeira possuem propriedades químicas em seu cerne que conferem a capacidade de resistir à deterioração por agentes biológicos. Tais propriedades são denominadas durabilidade natural da madeira, ou resistência natural.

Dentre as espécies que apresentam elevada resistência natural, destaca-se a madeira *Tectona grandis* L., comumente conhecida como teca. Nativa do subcontinente Índico e sudeste asiático, a *T. grandis* pode ser cultivada em diferentes regiões tropicais e sua área plantada chega a aproximadamente 4,3 milhões de hectares. No Brasil, a cultura comercial de teca é realizada nos estados do Mato Grosso, Amazonas, Acre e Pará, totalizando 87.502 hectares.

A madeira de teca possui um elevado valor de mercado, principalmente internacional, pois apresenta propriedades físicas e mecânicas que lhe conferem resistência, estabilidade dimensional e leveza, assim como suas características estéticas, ideal para produtos de alto valor agregado, como acabamentos, esquadrias, mobília de alto padrão e indústria naval. Seus extrativos, além de lhe conferirem elevada durabilidade natural, também são objeto de estudos na indústria farmacêutica e química.

Para a melhor observação da deterioração da madeira por fungos, a microscopia eletrônica de varredura trata-se de uma das melhores técnicas utilizadas, pois mostra de forma tridimensional todas as alterações morfológicas decorrentes da sua colonização na madeira, como aumento do diâmetro das pontuações, diminuição da espessura da parede celular, perfurações enzimáticas e fissuras transversais às fibras. Além disso, tal técnica também permite melhor observação do desenvolvimento das hifas fúngicas no tecido do lenho.

A análise química da madeira deteriorada por fungos pode indicar, por meio de diferentes solubilidades, as diferentes fases da degradação dos compostos lignocelulósicos, desde a fase inicial, onde observa-se a degradação e utilização de compostos de baixa massa molecular pelos fungos, a decomposição de moléculas por meio de enzimas na fase intermediária e consequente formação de radicais livres, até a degradação à açúcares simples e compostos fenólicos de baixa massa molecular, o que indica a fase final do processo enzimático de degradação dos compostos estruturais e semiestruturais da madeira.

Diante de propriedades tão desejáveis e escassez de pesquisas sobre as alterações morfológicas e químicas desta espécie sob o ataque de fungos, a caracterização da deterioração da madeira de teca se faz necessária, para que, tanto sua madeira quanto os produtos dos processos de sua biodeterioração, como adequada utilização de seus extrativos, produção de enzimas, produção de lignina, biopolpação, biobranqueamento, dentre outros, sejam devidamente aproveitados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo geral analisar a biodeterioração da madeira de teca (*Tectona grandis* L.), submetida ao ataque de fungos basidiomicetos ao longo do tempo.

2.1.1 Objetivos específicos

- a) Avaliar a resistência natural da madeira de teca (cerne e alburno) ao longo do tempo submetida a três fungos basidiomicetos de podridão branca e parda;
- b) Observar a biodeterioração da madeira ao longo do tempo por meio de microscopia eletrônica de varredura;
- c) Realizar a análise química da madeira durante o processo de biodeterioração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A MADEIRA DE TECA

A *Tectona grandis* L. é uma espécie arbórea latifoliada da família Lamiaceae (ex Verbenaceae), popularmente conhecida como teca (FIGURA 1). É nativa do subcontinente Índico e sudeste asiático, dotada de alta adaptabilidade, podendo ser cultivada em diferentes regiões tropicais (CHAVES; FONSECA, 1991). Estima-se que há aproximadamente 4,3 milhões de hectares plantados com esta espécie, sendo 83% concentrados na Ásia, 11% na África e 6% na América tropical (IUFRO, 2019). No Brasil, os plantios comerciais iniciaram-se no final da década de 1960, pela empresa Cáceres Florestal S.A., no município de Cáceres, estado de Mato Grosso, onde as condições naturais são semelhantes às dos países de origem da espécie (MATRICARDI, 1989). Hoje em dia, a *T. grandis* L. é plantada em escala comercial nos estados do Mato Grosso, Amazonas, Acre e Pará. A área de plantios florestais com teca no Brasil totaliza 87.502 hectares (SNIF, 2016). Trata-se de uma árvore de grande porte, que alcança até 60 m de altura, às vezes com raízes tabulares. As folhas são opostas, elípticas, com 30 a 40 cm de comprimento por 25 cm de largura, coriáceas e ásperas com pecíolos curtos ou ausentes, ápice e bases agudas. As inflorescências são do tipo panícula com flores pequenas e brancas. O fruto é uma drupa coberta de pelos aveludados, pardos ou esbranquiçados tendo uma casca dura, sem sementes, ou variando entre uma e quatro sementes (HIGUCHI, 1979).

FIGURA 1 – PLANTAÇÃO DE *Tectona grandis*

FONTE: AOUDJI (2014).

A madeira de teca (FIGURA 2) possui um alburno estreito e claro, bem distinto do cerne, cuja cor é marrom viva e brilhante (LAMPRECHT, 1990), apresentando limites de anéis de crescimento distintos (RICHTER; DALLWITZ, 2009). Possui massa específica aparente média de $0,65 \text{ g/cm}^3$, com boa resistência à tração e flexão (TSOUMIS, 1991). A madeira apresenta alta estabilidade dimensional, resistindo às variações de temperatura e umidade, não apresentando empenamentos e contrações durante a secagem (ANGELI, 2003). Seu cerne apresenta-se como resistente a tratamentos preservativos, porém, apresenta alta durabilidade natural contra fungos e insetos xilófagos (TSOUMIS, 1991). Suas propriedades são desejáveis para a geração de produtos de maior valor agregado (PMVA), como móveis, esquadrias e móveis de alto padrão, embarcações e decoração (LOIOLA, 2015). Em função de suas características e propriedades únicas e superiores, a madeira de teca é uma excelente alternativa às espécies nativas de elevado valor econômico, como o mogno brasileiro (*Swietenia macrophylla* K.), o que justifica a importância do estudo de suas propriedades.

FIGURA 2 – DETALHE DE MADEIRA SERRADA DE TECA



FONTE: A Autora (2017).

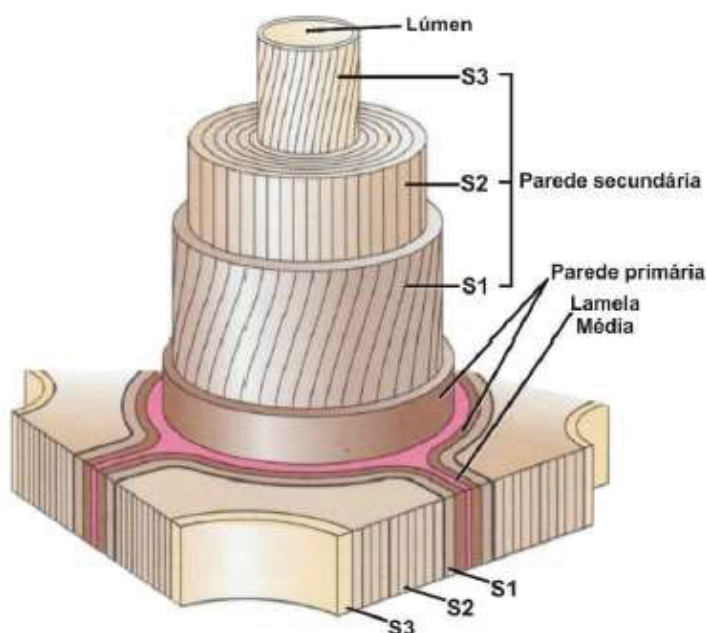
LEGENDA: A - Madeira de cerne
B - Madeira de alburno

3.2 ESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA

A madeira é um material heterogêneo e sua variabilidade estrutural e química reflete em uma ampla gama de propriedades físicas, tais como: densidade, permeabilidade, comportamento quanto a capilaridade, condutividade térmica, difusão da água de impregnação, dentre outras. O arranjo de seus componentes define a estrutura lenhosa como uma engenhosa organização arquitetônica (LEPAGE, 1986).

A ultraestrutura da parede celular é formada por diversas camadas: parede primária (P), parede secundária externa (S1), parede secundária média (S2) e parede secundária interna (S3) (ERICKSSON; BLANCHETTE; ANDER, 1990). Estas camadas são compostas por microfibrilas celulósicas orientadas no espaço de forma definida, dependendo da camada (CARVALHO et al., 2009). A lamela média, composta predominantemente de lignina, tem como função unir as células umas às outras (TSOUMIS, 1991). A FIGURA 3 apresenta um modelo da ultraestrutura da parede celular da madeira:

FIGURA 3 – ULTRAESTRUTURA DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA



FONTE: ZEIGER (2002). Adaptado por COLDEBELLA (2016).

A madeira de folhosas é estruturalmente complexa e apresenta maior diversidade de padrões de organização celular que a madeira de coníferas. Três tipos básicos de células são encontrados nesta categoria: aquelas que compõem os vasos, as fibras e as células do raio (CARVALHO et al., 2009). O principal diferencial entre a estrutura de coníferas e folhosas é a presença de vasos. Os vasos são um conjunto normalmente axial de células sobrepostas (elementos vasculares) formando uma estrutura tubiforme contínua de comprimento indeterminado, que tem como função a condução ascendente de líquidos na árvore (BURGER, 1991). De acordo com o mesmo autor, a comunicação entre as células adjacentes, assim como a distribuição de líquidos e nutrientes transportados pelos vasos se dá por meio de pontuações em suas paredes, que podem ser simples ou areoladas. A madeira também apresenta células epiteliais responsáveis pela secreção de resinas e gomas (KOLLMANN; COTÉ, 1968). As células do parênquima são responsáveis pela armazenagem de nutrientes, e são bem menores que outras células do lenho (TSOUMIS, 1991). A maioria das células do parênquima não são lignificadas e não apresentam parede secundária (BURGER, 1991).

Em uma certa idade, a madeira interna do caule de folhosas começa a mudar para o cerne, tecido onde já não há mais atividade metabólica. A proporção de cerne

do caule se torna maior à medida em que a árvore cresce. As células do parênquima quando morrem, produzem depósitos orgânicos, como resinas, substâncias fenólicas e pigmentos (SJÖSTRÖM, 1981). Em algumas madeiras, à medida em que o cerne se forma, os vasos são fechados por tilos, que são formadas por finas membranas resultantes da proliferação de células do parênquima que acabam por penetrar no lume dos vasos através de suas pontoações (BURGER, 1991). As tiloses podem interromper o fluxo de produtos preservantes, assim como também do licor de cozimento em processos de produção de polpa celulósica (KOLLMANN; COTÉ, 1968).

O tecido de sustentação mecânica das folhosas são as fibras libriformes e fibro-traqueóides. A diferença básica entre tais células está em suas pontoações, onde os fibro-traqueóides apresentam pontoações areoladas e as fibras libriformes, pontoações simples (HIGUCHI, 1985). O tamanho das fibras é variável de acordo com a espécie, e normalmente medem entre 1 e 2mm (TSOUMIS, 1991). Suas porções no volume total do lenho, assim como a espessura de sua parede celular, influenciam diretamente na massa específica e na alteração volumétrica da madeira e indiretamente em suas propriedades mecânicas (BURGER, 1991).

As células do parênquima, assim como nas coníferas, têm como função o armazenamento. Porém, em folhosas, tais células apresentam uma variedade morfológica bem maior, variando em tipo, tamanho e número de células (BURGER, 1991). O parênquima axial, por exemplo, encontra-se praticamente ausente em coníferas, porém é encontrado em abundância nas folhosas, podendo ser vistos a olho nu em algumas espécies (TSOUMIS, 1991).

A estrutura e a composição química da madeira têm uma influência significativa na ação de microrganismos e nos padrões resultantes de deterioração. O tipo de célula, composição química e morfologia da parede celular podem controlar os efeitos enzimáticos desses microrganismos no tecido lenhoso (ERICKSSON; BLANCHETTE; ANDER, 1990).

A madeira de teca apresenta fibras com paredes de espessura média, e podem ter a presença de septos ou não (RICHTER; DALLWITZ, 2009). A presença de tilose é abundante (TSOUMIS, 1991). Chagas et al., (2014), ao analisarem microscopicamente a madeira de teca, observaram a presença de parênquima radial multisseriado, apresentando de duas a cinco células de largura, e composto exclusivamente por células procumbentes.

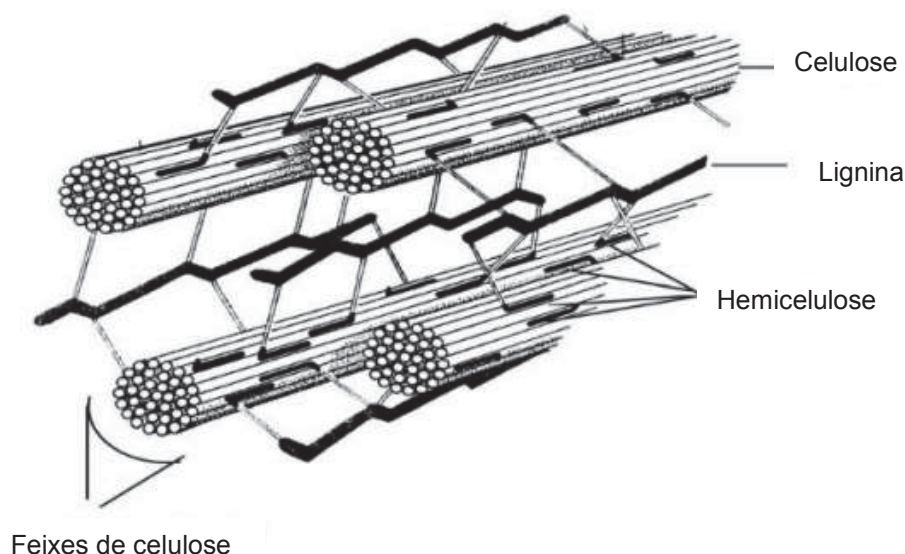
3.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA

Os principais elementos constituintes da madeira são o carbono (C) com aproximadamente 50% em sua composição, o hidrogênio (H) este com 6% e o oxigênio (O₂) com 44% (ROWELL, 2012), além de pequenas quantidades de minerais, como cálcio (Ca), potássio (K) e magnésio (Mg) (KLOCK et al., 2015).

De acordo com Oliveira et al., (1996), a composição química da madeira é caracterizada pela presença de componentes fundamentais (primários) e complementares (secundários). Os componentes primários caracterizam a madeira, pois são parte integrante das paredes das fibras e da lamela média. São considerados componentes primários, a celulose, a hemicelulose e a lignina.

A proporção entre os componentes da parede celular depende da espécie vegetal e varia de camada para camada. Em geral, o teor de lignina encontrado em madeiras de coníferas (25-35%) é superior àquele encontrado em madeiras de folhosas (18-25%), porém, algumas folhosas tropicais podem possuir teores de lignina mais elevados que os apresentados pela maioria das coníferas (HON; SHIRAISHI, 2006). Enquanto a lignina responde por até 84% do peso da lamela média composta (LM + P), a parede secundária interna (S3) é constituída por até 87% de hemicelulose, com pouca lignina. A parede secundária média (S2), usualmente mais espessa que as demais, apresenta em média 54% de celulose (CARVALHO et al., 2009). A FIGURA 4 mostra a disposição dos constituintes da parede celular:

FIGURA 4 – DISPOSIÇÃO DOS CONSTITUINTES DA PAREDE CELULAR DA MADEIRA

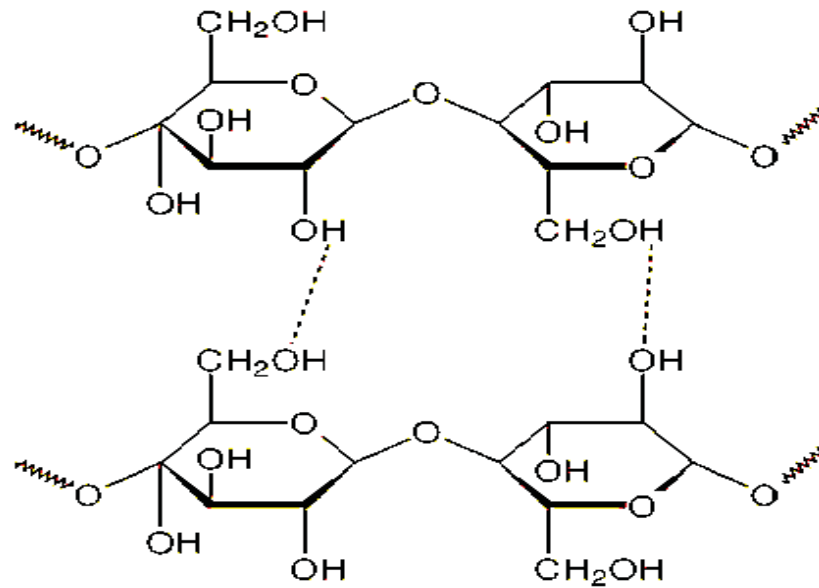


FONTE: Adaptado de MURPHY; MCCARTHY (2005).

3.3.1 Celulose

É o componente principal da madeira, com aproximadamente 40 – 45% de sua estrutura, localizada predominantemente na parede secundária (SJÖSTRÖM, 1981). Trata-se de um polímero linear de glicose de alta massa molecular formado de ligações β 1,4 glicosídicas, tornando-se difícil sua separação do tecido lignocelulósico (MENEZES; BARRETO, 2015). A molécula de celulose apresenta cadeia longa e sem ramificações, caracterizando-se por regiões cristalinas em grande parte de seu comprimento, entrecortadas por zonas amorfas (SILVA, 2007). Essas diferenças são responsáveis por algumas variações de comportamento físico, que podem ser observadas em uma molécula de celulose. Por exemplo, a absorção de água e inchamento de uma molécula de celulose é limitada às regiões amorfas da molécula. A forte rede de ligações de hidrogênio (FIGURA 5) das regiões cristalinas impede a ocorrência do processo de inchamento nessas áreas (CASTRO, 2009).

FIGURA 5 - MOLÉCULA DE CELULOSE E SUAS LIGAÇÕES DE HIDROGÊNIO



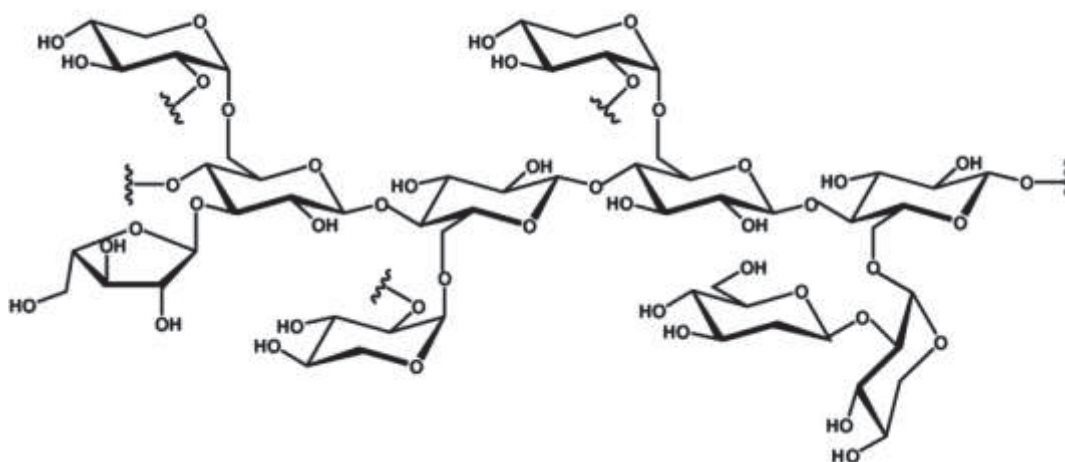
FONTE: SANTOS (2001).

3.3.2 Hemiceluloses

As hemiceluloses (FIGURA 6) são polissacarídeos associados à celulose e às ligninas em tecidos vegetais. Enquanto a celulose é formada pela repetição da mesma unidade monomérica, nas hemiceluloses aparecem condensadas diversas dessas unidades (LEPAGE, 1986).

A cadeia principal de uma hemicelulose pode ser constituída por uma única unidade (homopolímero) como, por exemplo, xilanas, ou por duas ou mais unidades (heteropolímeros) a exemplo, glucanas. Algumas das unidades são sempre, ou algumas vezes, grupos laterais da cadeia principal como a galactose e ácido o-metil glicouronico (BROWNING, 1963).

FIGURA 6: ESTRUTURA DA HEMICELULOSE



FONTE: Adaptado de DONATE (2014).

3.3.3 Holocelulose

A holocelulose é definida como a fração de carboidratos insolúveis em água presentes na madeira (ROWELL, 2012), ou seja, a holocelulose trata-se da combinação da celulose e hemicelulose e compreende cerca de 65 a 70% da massa seca da madeira (ROWELL; ROWELL, 1997). A associação de um grupo de cadeias de celulose envolvidas por moléculas de hemicelulose são denominadas microfibrilas (ZIGLIO, 2010).

Bellon (2013) encontrou valores médios de holocelulose de 59,4%. Loiola (2015), ao analisar madeiras de teca com idade de 20 anos, determinou valores médios de 56,29%.

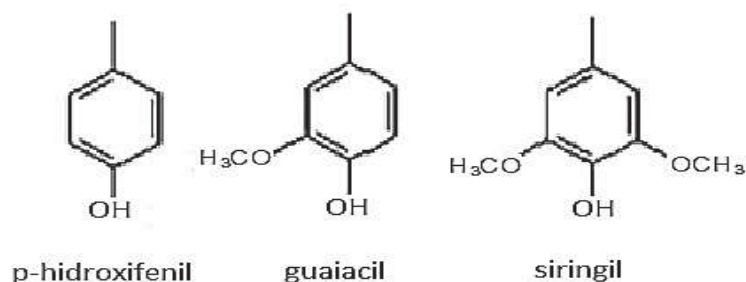
3.3.4 Lignina

A lignina representa o segundo componente essencial presente na madeira, atrás apenas da celulose (HON; SHIRAISHI, 2006). Do ponto de vista morfológico a lignina é uma substância amorfa composta basicamente por unidades de fenilpropano, contendo subestruturas fenólicas e não fenólicas, localizada na lamela média composta, bem como na parede secundária (ARANTES; MILAGRES, 2009).

A formação da lignina se dá pela polimerização de três álcoois precursores que dão origem às unidades aromáticas (FIGURA 7) denominadas siringil, guaiacil e p-hidroxifenil (DENCE; TIMELL, 1992). A madeira de coníferas é composta

basicamente por unidades de guaiacil. Já a madeira de folhosas é composta de unidades de guaiacil e siringil. A lignina de gramíneas possui também p-hidroxifenil (HON; SHIRAISHI, 2006).

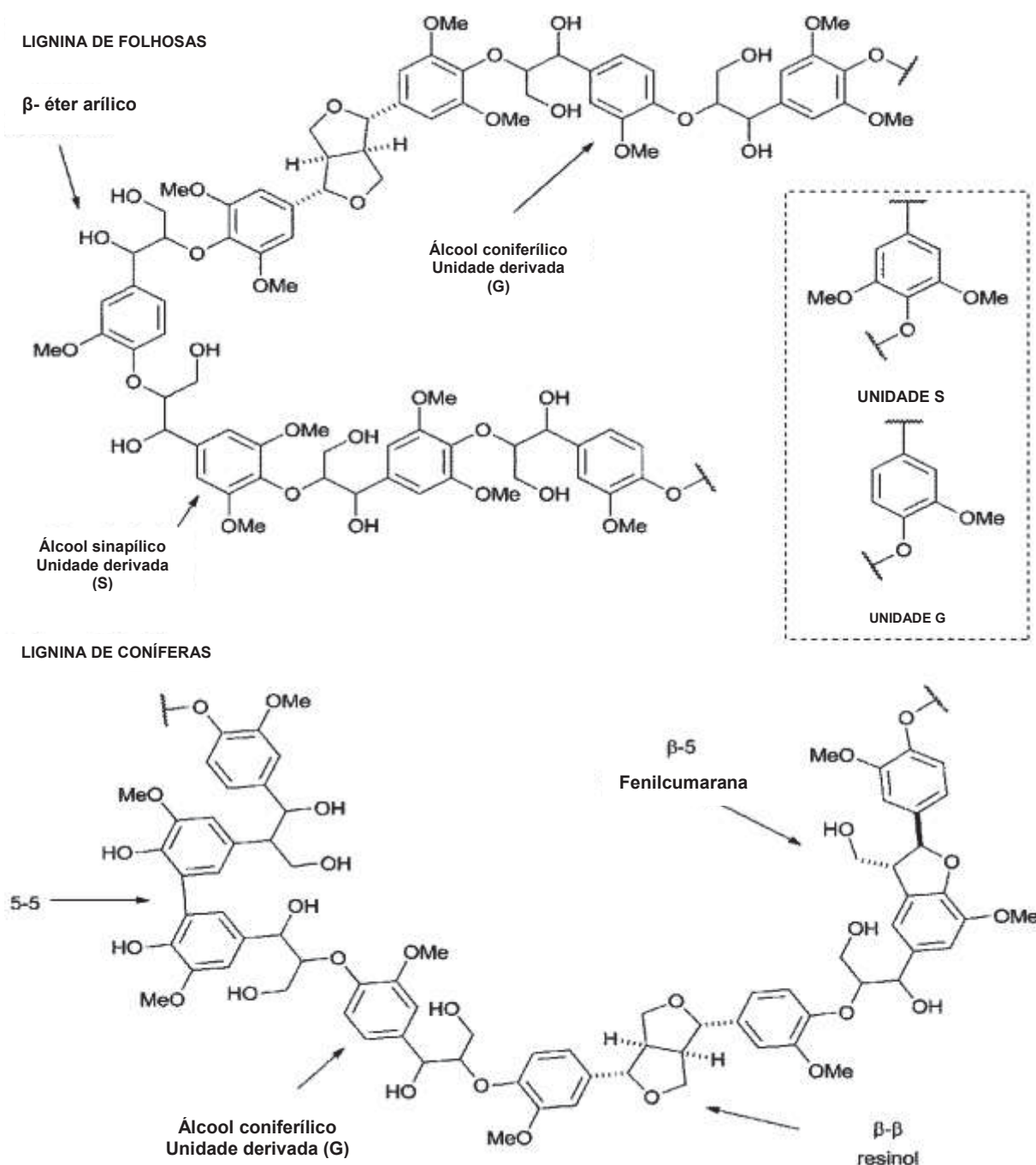
FIGURA 7 - UNIDADES AROMÁTICAS COMPONENTES DA LIGNINA



FONTE: BUDZIAK (2003).

A lignina trata-se do polímero mais complexo entre os materiais de alto peso molecular de ocorrência natural e as investigações dedicadas à elucidação de sua estrutura estão em andamento por um longo período de tempo (HON; SHIRAISHI, 2006). Lancefield e Westwood (2015) sintetizaram e caracterizaram um modelo avançado de polímeros de lignina, tanto para coníferas quanto para folhosas, baseado em suas unidades aromáticas fundamentais, visando o desenvolvimento de metodologias para o processo de despolimerização de produtos aromáticos, como demonstrado na FIGURA 8:

FIGURA 8 - MODELO DE ESTRUTURAS DE LIGNINA EM FOLHASAS E CONÍFERAS.



FONTE: Adaptado de LANCEFIELD; WESTWOOD (2015).

A lignina é considerada como um dos materiais mais resistentes na natureza. Na biomassa vegetal, a lignina está associada juntamente com a celulose e hemicelulose, o que impede a deterioração desses materiais, isto é, a lignina confere firmeza e rigidez ao conjunto de fibras de celulose. Portanto, a lignina não deve ser considerada como uma substância química única, mas sim, como uma classe de materiais correlatos (CASTRO, 2009).

A madeira de teca apresenta uma concentração de lignina total considerada elevada em comparação com a média geral de folhosas (CHAGAS, 2013), sendo uma espécie bastante promissora para a produção deste composto para fins industriais. Tal propriedade também influi em sua considerável resistência mecânica, elevada estabilidade dimensional (KOLLMANN; COTÉ, 1968). Pinto (2007), ao caracterizar quimicamente a madeira de teca com idade de 30 anos observou uma concentração de lignina total de 33%. Chagas (2013) obteve uma média de 31% de lignina total em madeira de teca com idades de 4, 6 e 12 anos, porém foram encontrados teores de lignina total de 35% nesta espécie (PETTERSEN, 1984; GOMEZ, 2012).

3.3.5 Extrativos

Os extrativos são químicos não estruturais que são produzidos principalmente durante a formação do cerne. Eles conferem cor e durabilidade à madeira, e alguns podem causar cerosidade, odor, sabor ou toxicidade (HOPEWELL, 2011). Este termo se refere às substâncias de baixa ou média massa molecular, que podem ser extraídas em água ou solventes orgânicos (SJÖSTRÖM; ALLEN, 1998).

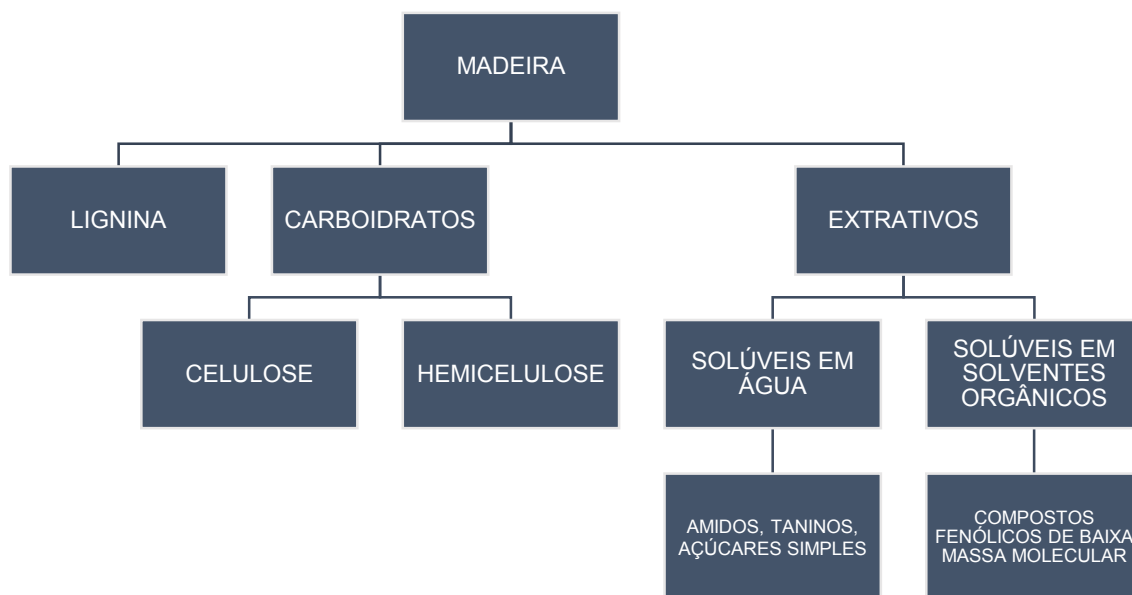
Elementos que podem ser extraídos em água são geralmente caracterizados por açúcares simples, amidos, taninos e alguns materiais inorgânicos (cátions), como cálcio, potássio, magnésio e outros (HON; SHIRAISHI, 2006). Os extrativos removidos por solventes orgânicos tratam-se de substâncias orgânicas de baixo peso molecular, como por exemplo compostos aromáticos, terpenos, ácidos alifáticos e álcoois (PETTERSEN, 1984).

De acordo com Chagas et al., (2014), a madeira de teca apresenta uma média de extrativos totais de 4,76% em madeiras de 12 anos de idade. Porém, Loiola (2015) determinou valores médios de 11,3% para madeira de teca com idade de 20 anos, enquanto Lobão et al., (2011) encontraram valores médios de 9,74%. Hopewell (2011) afirmou, ao realizar a extração de madeira de cerne de teca por solventes orgânicos, que a maior parte de tais compostos são constituídos por material resinoso, considerado o composto mais abundante presente no cerne de madeira de teca. Wolfsmayr et al., (2008), ao estudarem microscopicamente a presença de extrativos em madeira de teca com idade de 15 anos, observaram a presença abundante de extrativos nas células do parênquima, vasos e fibras, tanto em madeira de cerne,

quanto de alburno, mesmo após o preparo dos corpos de prova em água em ebulição por vários períodos.

A FIGURA 9 resume a constituição química da madeira, seus compostos estruturais e extrativos:

FIGURA 9 - COMPONENTES QUÍMICOS CONSTITUINTES DA MADEIRA



FONTE: A Autora (2017).

3.4 BIODETERIORAÇÃO DA MADEIRA POR FUNGOS

Por ser um material quimicamente orgânico e heterogêneo, a madeira é susceptível a danos causados por um conjunto variado de agentes biológicos, tais como bactérias, fungos, insetos, moluscos e crustáceos (PALA, 2007). Dentre os agentes biológicos responsáveis pela deterioração da madeira, os fungos são considerados os mais significativos, responsáveis pela maior parte dos danos encontrados (MORESCHI, 2013). A madeira sob ataque de fungos apresenta alterações na sua composição química, redução da resistência mecânica, diminuição de massa, modificação da cor natural, aumento da permeabilidade, redução da capacidade acústica, aumento da inflamabilidade, diminuição do poder calorífico e maior propensão ao ataque de insetos, comprometendo, dessa forma, a sua qualidade e inviabilizando a sua utilização para fins tecnológicos (SANTOS, 1992). Por outro lado, a biodegradação de materiais lignocelulósicos tem sido objeto de muitos

estudos, pois, além de corresponder a uma importante etapa do ciclo do carbono na natureza, também pode ser aplicada em processos biotecnológicos, como o pré-tratamento nos processos de produção de celulose e papel (AGUIAR; FERRAZ, 2011).

Os fungos são organismos heterotróficos, eucarióticos e podem ser unicelulares ou pluricelulares, estes últimos caracterizados pela formação de estruturas filamentosas, as hifas, cujo conjunto constitui o micélio. Na fase reprodutiva, o micélio forma estruturas assexuadas e/ou sexuadas que originam os esporos, principais responsáveis pela propagação das espécies (MAIA; CARVALHO JÚNIOR, 2010). Sua parede celular é rígida e composta de modo geral por glucanas, mananas, quitina, proteínas e lipídios (TRABULSI, 2008). Por causa da rigidez de sua parede celular, sua nutrição é por absorção de nutrientes solúveis simples, por meio de liberação de enzimas e outros compostos. Realizam respiração celular para obtenção de energia, e sua reserva energética é sob a forma de glicogênio (MOLINARO, 2009).

Para que um fungo possa penetrar na madeira e uma vez instalado possa se desenvolver e utilizar os seus constituintes, são necessárias de algumas condições básicas, as quais se relacionam à fonte de alimento (C e N), teor de umidade da madeira, temperatura, oxigênio e pH (CARVALHO et al., 2009). Embora as condições ideais de tais parâmetros variem para cada espécie (SHMIDT, 2006), de um modo geral, a temperatura ideal para o desenvolvimento de fungos xilófagos está entre 24 e 32 °C, pH entre 4,5 e 5,5 e umidade entre 20 e 80% (MORESCHI, 2013). Com relação aos níveis de oxigênio, de acordo com o mesmo autor, a atividade metabólica torna-se mais eficiente nos níveis semelhantes à concentração atmosférica, porém, os mesmos podem se desenvolver com valores inferiores a 20%.

A Biodeterioração da madeira causada por fungos em folhosas inicia-se com a penetração da hifa fúngica pelos vasos e destes para o lúmen da célula através de suas pontuações (KOLLMANN; COTÉ, 1968). Para se estabelecer, o fungo promove uma intensa secreção de metabólitos extracelulares, especialmente enzimas, que levam à despolimerização dos componentes da parede celular vegetal (celulose, hemicelulose e lignina) em moléculas menores, as quais podem ser transportadas através da membrana plasmática fúngica e adentrar o metabolismo intracelular (CARVALHO et al., 2009). De acordo com o mesmo autor, fungos causadores de podridão da madeira podem ser classificados em três grupos distintos, de acordo com a atividade de suas enzimas: fungos de podridão branca, capazes de degradar os três

componentes da parede celular vegetal (celulose, hemiceluloses e lignina); fungos de podridão parda, capazes de deteriorar principalmente as frações polissacarídicas (celulose e hemiceluloses) e, fungos de podridão mole, que podem deteriorar tanto os polissacarídeos quanto a lignina, porém em velocidades reduzidas.

Diversas enzimas são produzidas por fungos xilófagos durante a colonização da madeira e os complexos produzidos realizam suas atividades por processos hidrolíticos e oxidativos. As enzimas responsáveis pela degradação da celulose e das hemiceluloses são hidrolases que apresentam certa especificidade pelo respectivo substrato, ao passo que as enzimas envolvidas na decomposição da lignina são oxidases e, em geral, são pouco específicas (ARANTES; MILAGRES, 2009). As principais enzimas envolvidas na degradação da madeira são as celulasas, que compreendem as endo-1,4- β -glucanases, as celobio-hidrolases e as 1,4- β -glucosidases; as hemicelulasas, que compreendem as xilanases, mananases, α -glicuronidases e acetil-esterases. Um vasto grupo de enzimas é responsável pela decomposição da lignina, de forma geral, pode-se classifica-las como fonoloxidasas e enzimas que dependem de peróxido de hidrogênio (AGUIAR; FERRAZ, 2011).

Apesar dos fungos apodrecedores produzirem as enzimas que degradam compostos lignocelulósicos, a maioria deles não produz todo o conjunto de enzimas responsáveis pela degradação desses compostos (ERICKSSON; BLANCHETTE; ANDER, 1990). Além disso, muitas das enzimas possuem dimensão molecular muito elevadas para penetrar na parede celular intacta nos estágios iniciais da degradação. Diante de tais situações, além das enzimas, os fungos xilófagos contam com a produção de diversos compostos de baixa massa molecular que auxiliam no processo enzimático de decomposição, como ácidos, álcool veratrílico, peptídeos, compostos aromáticos e fenólicos (ARANTES; MILAGRES, 2009).

Dentre os fungos responsáveis pela deterioração da madeira, destacam-se aqueles pertencentes ao filo Basidiomycota, no qual se encontram os fungos responsáveis pela podridão parda e podridão branca, que possuem características enzimáticas próprias quanto à decomposição dos constituintes primários da madeira (OLIVEIRA et al., 1986; SILVA et al., 2014). O Filo Basidiomycota apresenta fungos predominantemente saprófitos, de morfologia bastante diversificada que, na reprodução sexuada, formam esporos (basidiósporos) liberados por estruturas especializadas, os basídios, encontrados em basidiocarpos que podem ser vistosos e alcançar tamanho destacado (MAIA; CARVALHO JÚNIOR, 2010). Os representantes

desse filo são popularmente designados cogumelos, boletos, estrelas da terra, orelhas-de-pau, ferrugens e carvões (FREITAS et al., 2006).

3.4.1 Podridão branca

Os fungos de podridão branca oxidam a lignina, enquanto a celulose e as hemiceluloses são degradadas em proporções variadas (OLIVEIRA et al., 1986). A sua capacidade para remover os polímeros estruturais é muito diversa, algumas espécies são denominadas seletivas pois removem inicialmente a lignina, outras removem simultaneamente a lignina e a holocelulose, denominando-se não seletivas (ZABEL; MORELL, 1992), embora um mesmo fungo possa apresentar as duas formas de degradação em regiões diferentes da madeira (ERICKSSON; BLANCHETTE; ANDER, 1990). Uma característica marcante deste tipo de podridão são linhas escuras na madeira atacada, sinal da produção de fenoloxidasas que possuem a capacidade de transformar alguns compostos em melanina (SHMIDT, 2006). A madeira degradada por estes fungos (FIGURA 10) apresenta-se mais clara e macia do que a madeira não deteriorada e tem as suas propriedades físicas e mecânicas afetadas, causando uma diminuição significativa na resistência e um aumento na permeabilidade da madeira (OLIVEIRA et al., 1986).

FIGURA 10: MADEIRA DETERIORADA POR FUNGO DE PODRIDÃO BRANCA



FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: A - linhas de melanina

O fungo *Trametes versicolor* L. Lloyd, representado pela FIGURA 11 é um exemplo causador de podridão branca não seletiva, ou seja, um fungo capaz de degradar todos os componentes estruturais da célula da madeira simultaneamente. Trata-se de um basidiomiceto da família Polyporaceae, sua temperatura ótima para desenvolvimento é entre 24 e 33 °C (SHMIDT, 2006). São fungos capazes de sintetizar celulasas, hemicelulasas e ligninases (GAUTAM, 2013) e são de extrema importância por suas propriedades medicinais, como na pesquisa de neoplasias (HOBBS, 2004).

FIGURA 11 – BASIDIOCARPO DE *Trametes versicolor*



FONTE: MYCOBANK (2016).

3.4.2 Podridão parda

Os basidiomicetos causadores de podridão parda degradam preferencialmente os polissacarídeos presentes na madeira (COLLETT, 1984; GREEN; HIGHLEY, 1997; MONRROY et al., 2011). São fungos que podem quebrar a estrutura altamente ordenada da porção cristalina da celulose. Os fungos de podridão parda podem também oxidar parcialmente a lignina (JENSEN et al., 2001; MONRROY et al., 2011), ou apenas alterar sua estrutura (ARANTES; MILAGRES, 2009).

A madeira atacada por fungos causadores de podridão parda (FIGURA 12) apresenta rápida perda da estabilidade dimensional, devido a rápida degradação da celulose e hemicelulose nos estágios iniciais da degradação. Devido a lignina residual, a madeira apresenta-se com coloração escura e, quando seca, apresenta a formação

de pequenos blocos retangulares pelo surgimento de fendas paralelas e perpendiculares à grã da madeira (SHMIDT, 2006).

FIGURA 12: MADEIRA DETERIORADA POR FUNGO DE PODRIDÃO PARDA



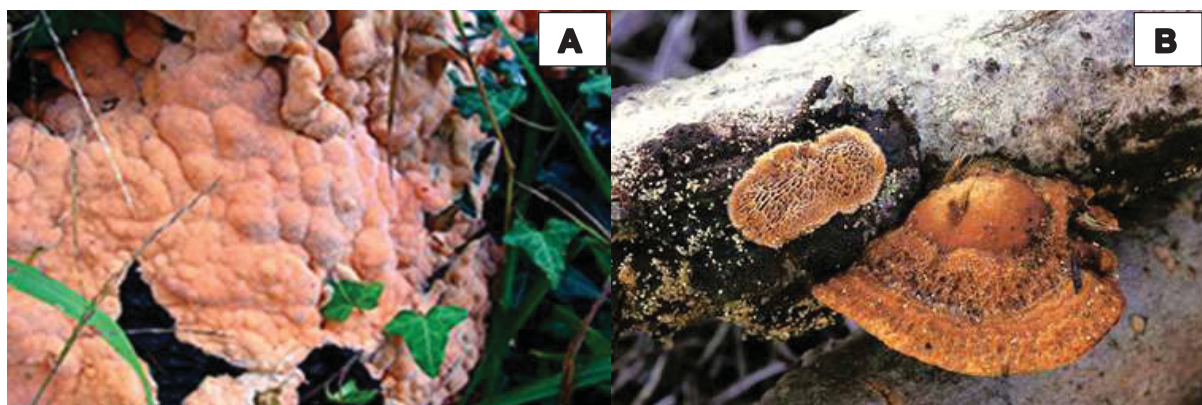
FONTE: A Autora (2017).

Fungos de podridão parda não apresentam enzimas ligninolíticas, necessitando da ação de compostos de baixa massa molecular para alterar sua estrutura (SHMIDT, 2006), embora os fungos *Postia placenta* (Fr.) M. J. Larsen and Lombard e *Gloeophyllum trabeum* Pers. Murr., representados pela FIGURA 13, sejam capazes de produzir lacases (D'SOUZA et al., 1996; WEI et al., 2010). Ambos os fungos tratam-se de modelos característicos para ensaios em laboratório (ARIMOTO et al., 2015).

O fungo *G. trabeum* pertence à família dos Gloeophyllales (MYCOBANK, 2016) e, como todos os fungos de podridão parda, possuem preferência por coníferas (KOLLMANN; COTÉ, 1968). A temperatura ideal para seu desenvolvimento situa-se entre 30 e 37,5 °C e são comumente encontrados em países subtropicais (SHMIDT, 2006). São responsáveis pela produção de endoglucanases, glucanases e glicosidades (ATCC, 2016).

O fungo *P. placenta* pertence à família Fomitopsidaceae e a temperatura ótima para seu desenvolvimento é de 25 °C (SHMIDT, 2006). Produz glucanases e glicosidades (ATCC, 2016).

FIGURA 13 - BASIDIOCARPOS DE FUNGOS DE PODRIDÃO PARDA



FONTE: MYCOBANK (2016).

LEGENDA: A - *Postia placenta*

B - *Gloeophyllum trabeum*

3.5 RESISTÊNCIA NATURAL DA MADEIRA DE TECA

A resistência da madeira à deterioração é a capacidade inerente à espécie de resistir à ação de agentes deterioradores, incluindo agentes biológicos, físicos e químicos (PAES et al., 2004). Entretanto, devido à frequência e importância da deterioração biológica, a resistência natural é normalmente entendida como referente aos agentes biológicos (LOPEZ; MILANO, 1986). Essa resistência é atribuída à presença de substâncias no lenho, especificamente no cerne, que podem ser tóxicas a fungos e a insetos xilófagos (SILVA et al., 2003), prolongando assim a durabilidade de árvores vivas e da madeira (KOLLMANN; COTÉ, 1968).

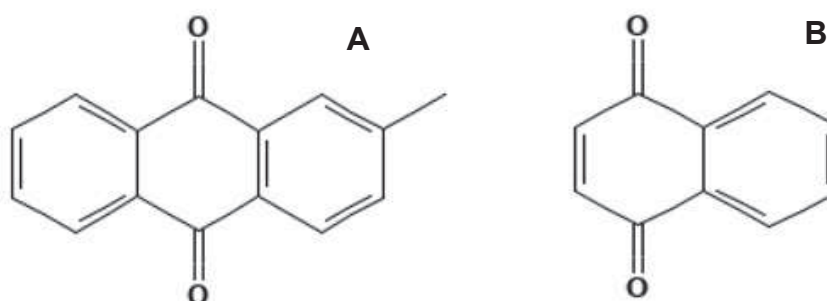
Com a morte da maioria das células do parênquima, inicia-se a formação do cerne, e muitas mudanças químicas ocorrem. Como consequência, grandes quantidades de extrativos são formadas e contidas em seu tecido (SJÖSTRÖM, 1981)

Segundo Paes et al., (2004), o conhecimento da resistência natural das madeiras é importante para recomendação do uso mais adequado da mesma, poupando gastos desnecessários e reduzindo os impactos sobre as florestas remanescentes.

O cerne de *T. grandis* contém uma grande quantidade de quinonas, que possuem grande influência na durabilidade natural da madeira de teca (NASCIMENTO et al., 2013). As quinonas constituem uma classe especial de dicetonas cíclicas α e β não saturadas (LEONARDO et al., 2015) e lhes são atribuídas propriedades antifúngicas, bactericidas e repelentes a ataques de alguns insetos,

sendo por isso responsabilizada pela durabilidade da madeira quando exposta aos rigores do tempo (RUDMAN; COSTA, 1958; RANGANATHAN et al., 1949; SANDERMANN; SIMATUPANG, 1966; MOREIRA et al., 2006; LEONARDO et al., 2015). Dentre os compostos quinônicos encontrados na madeira de teca, a naftoquinona (1,4 - naftoquinona) desempenha um papel fundamental na resistência da teca contra o ataque de fungos e a tectoquinona (2-metilantraquinona) apresentou forte atividade antitermética e assume-se estar na origem da resistência natural da madeira de teca aos cupins (NASCIMENTO et al, 2013). Hopewell (2011), afirmou que compostos quinônicos são o segundo componente mais abundante entre os extrativos de madeira de teca, com destaque para a tectoquinona e naftoquinona. As antraquinonas são objeto de estudo por possuírem elevado potencial biotecnológico (LEONARDO et al, 2015) e farmacêutico (FONSECA et al., 2003). A FIGURA 14 representa as estruturas moleculares dos principais compostos quinônicos encontrados na madeira de teca:

FIGURA 14 – PRINCIPAIS COMPOSTOS QUINÔNICOS PRESENTES EM MADEIRA DE *Tectona grandis*



FONTE: Adaptado de PUBCHEM (2017).

LEGENDA: A – Tectoquinona (2-metilantraquinona)

B – Naftoquinona (1,4-naftoquinona)

De acordo com a classificação da norma da “*American Society for Testing Materials*” ASTM D 2017-05, a madeira de teca é considerada como altamente resistente (ANGELI, 2003). Motta et al., (2013) ao submeter a madeira de teca ao ataque dos fungos *P. placenta*, *Neolentinus lepideus* Fr. Redhead & Ginns e *Polyporus fumosus* Pers. Fr., encontraram valores de perda de massa de 7,51%, 3,38% e 9,03% respectivamente, para o cerne interno. Paes et al., (2007), encontraram valores médios entre 7,48% e 11,67% para o fungo *P. placenta* e 6,74% e 11,12% para *P.*

fumosus em madeira de cerne. Moya et al., (2009), observaram valores menores que 11% para o cerne submetido a deterioração pelos fungos *T. versicolor* e *Pycnoporus sanguineus* L. Murrill.

3.6 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura se baseia no uso de um feixe de elétrons extremamente estreito aplicado para varrer a amostra, isto é, o feixe de elétrons é movido para diante e para trás enquanto passa através da amostra, fazendo que a mesma emita elétrons. Logo, a imagem é construída em sequência no tempo, na medida em que a amostra é varrida (GALLETI, 2003). Os sinais de maior interesse para a formação da imagem são os elétrons secundários e os retroespalhados. A medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem topográfica da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retroespalhados fornecem imagem característica de variação de composição (MALISKA, 2007).

4 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi realizado na Universidade Federal do Paraná, localizado em Curitiba - PR, entre os meses de outubro de 2016 e outubro de 2017.

4.1 SELEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A madeira de teca utilizada descende de um povoamento homogêneo, com idade de 20 anos, de Cuiabá, estado de Mato Grosso. Após o desdobro das toras, foram obtidas 150 tábuas, as quais foram secas em estufa convencional, a 67 ± 2 °C, de acordo com o programa de secagem determinado por Loiola (2015). Após o término do programa de secagem, as tábuas foram armazenadas no Laboratório de Secagem da Madeira da Universidade Federal do Paraná.

Para a realização deste estudo, 60 tábuas foram selecionadas, onde foram retirados 12 corpos de prova de cada tábua, nas dimensões de 2,5 x 2,5 por 0,9 centímetros, este último em direção à grã, sendo 360 de madeira de cerne e 360 de alburno, para o ensaio de deterioração acelerada em laboratório. Todas as tábuas selecionadas apresentaram-se livres de defeitos, nós ou sinais de deterioração.

4.2 ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma da “*American Society for Testing and Materials*” – ASTM D – 2017 (2005), que consiste em verificar a resistência natural da madeira ao ataque de fungos xilófagos. O ensaio foi realizado no Laboratório de Biodegradação e Preservação da Madeira da Universidade Federal do Paraná.

4.2.1 Cultura dos fungos

Os fungos *G. trabeum* (MAD-617), *P. placenta* (MAD-698) e *T. versicolor* (MAD 697), gentilmente cedidos pela Universidade Federal do Espírito Santo, foram inoculados em placa de Petri de 10 cm contendo meio de cultura batata dextrose ágar (BDA), e incubados em estufa à 25 ± 2 °C por 10 dias.

4.2.2 Caracterização do solo

O solo do presente estudo foi adquirido comercialmente, em uma empresa de fornecimento de solos para aterros. As análises de caracterização foram feitas de acordo com a norma da “*American Society for Testing Materials*” ASTM D 1413 – 07, e foi caracterizado como de textura média, não argilosa, com pH 6,2, umidade de 10.95% e capacidade de retenção de 25%. As análises foram realizadas no Laboratório de Química da Madeira da Universidade Federal do Paraná.

4.2.3 Preparo dos frascos

O ensaio foi realizado utilizando-se 280 frascos de vidro com volume de 450 mL e 80 frascos com volume de 600 mL, distribuídos aleatoriamente. Para os frascos de 450 mL adicionou-se 200 g de solo e 80 mL de água. Para os frascos com 600 mL, adicionou-se 270 g de solo e 108 mL de água. A quantidade de adição de água se dá de acordo com a seguinte fórmula:

$$\text{Quantidade de água} = (\text{WHC} \times 0,013 \times W_4) + W_3 - W_4$$

onde:

WHC = capacidade de retenção do solo;

W_3 = massa de solo a ser adicionado ao frasco;

W_4 = massa de solo a ser adicionada ao frasco depois de seca (105 ± 2 °C por 12 horas).

Após a adição da água e do solo, foram adicionadas duas lâminas alimentadoras de madeira de *Pinus taeda* em cada frasco, nas dimensões de 0,3 x 2,9 x 3,5 cm, esta última em direção da grã (FIGURA 15 A). Os frascos foram esterilizados em autoclave horizontal, a temperatura de 121 °C e 1 atm de pressão pelo período de duas horas para total esterilização do solo.

Após o resfriamento, os frascos foram inoculados, em capela de fluxo laminar, com fragmentos de aproximadamente 1 cm² provenientes das culturas puras dos fungos, e acondicionados em câmara de incubação (FIGURA 15 B) pelo período de

cinco semanas, para o desenvolvimento dos mesmos nas lâminas alimentadoras e colonização do solo (FIGURA 15 C)

A câmara de incubação utilizada neste estudo manteve temperatura de 26 ± 2 °C e umidade de $70 \pm 2\%$ controladas pelo sistema Arduino, de acordo com o modelo proposto por Milsted (2016).

4.2.4 Adição dos corpos de prova aos frascos

Após a confecção dos corpos de prova, os mesmos foram climatizados em câmara de incubação (temperatura de 26 ± 2 °C e umidade de $70 \pm 2\%$) e sua massa verificada a cada 24h até peso constante (massa inicial). Os corpos de prova foram então esterilizados em autoclave por um período de trinta minutos (temperatura de 121 °C e 1 atm de pressão) e adicionados aos frascos em capela de fluxo laminar. Dois corpos de prova foram adicionados em cada frasco. Para cada fungo, foram utilizados 240 corpos de prova, sendo 120 de madeira de cerne e 120 de alburno.

4.2.5 Incubação dos frascos em câmara climática

Com os frascos prontos para o ensaio (FIGURA 15 D), estes foram mantidos em câmara de incubação (temperatura de 26 ± 2 °C e umidade relativa de $70 \pm 2\%$) (FIGURA 15 E e F) pelo período de 120 dias. Coletas foram realizadas a cada quatro semanas, onde 60 corpos de prova, sendo 30 de cerne e 30 de alburno, foram retirados de forma aleatória para análise de perda de massa, análise microscópica e química. A FIGURA 16 ilustra os frascos após 120 dias de exposição aos fungos (final do ensaio).

FIGURA 15 - ETAPAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO PARA O FUNGO *Trametes versicolor*



FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: A - Frascos prontos para esterilização e inoculação dos fungos;
 B - Frascos ao final do terceiro dia de inoculação;
 C - Alimentadores cobertos por micélio ao final de 5 semanas;
 D - Adição dos corpos de prova;
 E - Ensaio em câmara climática;
 F - Frascos após a terceira semana de ensaio.

FIGURA 16 - FRASCOS COM CORPOS DE PROVA COBERTOS COM MICÉLIO AO FINAL DO ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO (120 DIAS).



FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: A - *Trametes versicolor*
B - *Gloeophyllum trabeum*
C - *Postia placenta*

A cada coleta, os corpos de prova foram delicadamente escovados para a retirada do micélio de sua superfície (FIGURA 17). Os mesmos foram então secos em estufa convencional a $30 \pm 2^\circ\text{C}$ por sete dias e climatizados a temperatura de $26 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade $70 \pm 2\%$. A massa dos corpos de prova foi verificada a cada 12 horas até atingir peso constante (massa final).

FIGURA 17 – CORPO DE PROVA DE MADEIRA DE ALBURNO SUBMETIDO AO ATAQUE DO FUNGO *Gloeophyllum trabeum* AO FINAL DO ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: A - Corpo de prova coberto com micélio ao final do ensaio e início do crescimento de basidiocarpos;
B - Corpo de prova após a remoção do micélio (porção transversal);
C - Corpo de prova após a remoção do micélio (porção radial).

4.2.6 Cálculo da perda de massa e massa residual

De acordo com a norma ASTM D 2017-05, o cálculo da perda de massa foi realizado pela seguinte fórmula:

$$\text{Perda de massa (\%)} = [(W_1 - W_2) / W_1] \times 10$$

onde:

W_1 = massa inicial (g).

W_2 = massa final (g).

O cálculo da massa residual, por definição da norma utilizada, também foi realizado e trata-se da diferença, em porcentagem, entre a massa total (100%) e a perda de massa:

$$\text{Massa residual (\%)} = 100 - \text{perda de massa.}$$

Os resultados do ensaio foram reportados de acordo com a escala determinada pela norma ASTM D – 2017 (2005), representados na TABELA 1.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA A FUNGOS XILÓFAGOS DE ACORDO COM A NORMA ASTM D – 2017 (2005)

Perda de massa (%)	Massa residual (%)	Resistência
0 - 10	90 – 100	Altamente resistente
11 – 24	76 – 89	Resistente
25 - 44	56 - 75	Resistência moderada
> 45	< 55	Não resistente ou pouco resistente

FONTE: Adaptado de ASTM (2005).

Ao analisar os resultados de perda de massa, é necessário se levar em consideração que tal método não reproduz valores quantitativos. Trata-se de uma metodologia qualitativa para a determinação relativa dos valores de perda de massa. Este método depende da atividade fisiológica de organismos vivos, portanto é necessário evitar a dedução de que os resultados são quantitativamente repetíveis ou reprodutíveis. (ASTM D 2017-05).

4.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Para a caracterização microscópica da madeira, quatro corpos de prova (dois de cerne e dois de alburno) foram retirados de cada coleta. A amostra, com dimensões aproximadas de 0,5 x 0,5 cm foi retirada da porção central dos corpos de prova e foram observados cortes tangenciais e radiais de cada amostra. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada em microscópio de bancada, da marca Hitachi, modelo TM 1000, com base de carbono. A análise de microscopia foi realizada no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Paraná.

Ao observarmos os resultados referentes à microscopia é necessário considerar a posição do corpo de prova para a retirada da amostra para a observação da deterioração, pois em um mesmo corpo de prova pode-se observar fases distintas da deterioração da madeira (KIM et al., 2015). Todas as amostras deste presente estudo foram retiradas da porção central do corpo de prova.

4.4 ANÁLISE QUÍMICA DA MADEIRA DE TECA

O estudo da quantificação dos componentes estruturais e secundários da madeira foi realizado no Laboratório de Química da Madeira da Universidade Federal do Paraná. A análise de solubilidade em hidróxido de sódio a 1%, extrativos totais e a determinação da lignina total foram realizadas de acordo com as referências TAPPI T 212 om-02 (2002), NBR 14853 (2010) e Gomide e Demuner (1986), respectivamente. Todas as análises químicas foram realizadas em triplicata.

4.4.1 Preparo da amostra

Para a análise da madeira sem deterioração, corpos de prova de 5,0 x 5,0 x 2,5 cm foram retirados de cada tábua, para cerne e alburno. O material foi picado, seco em estufa a 30 °C por um período de cinco dias. Após a secagem, o material foi moído em moinho de facas tipo Willey e classificado em peneiras de 40 e 60 mesh.

Após o início do ensaio de deterioração acelerada, a cada coleta, após a aferição da perda de massa, os corpos de prova foram submetidos ao mesmo procedimento realizado no material não deteriorado.

4.4.2 Solubilidade em hidróxido de sódio a 1 % (m/V)

A extração em soluções alcalinas a quente indica a remoção de extrativos e carboidratos de baixo peso molecular, que consistem basicamente em hemiceluloses e celulose degradada, indicando o grau de deterioração causada por fungos ou deterioração por calor, luz, oxidação. (TAPPI T 212 om-02).

Para a realização da análise, 2,0 g de amostra seca foram adicionados em béquer juntamente com 100 mL de solução de NaOH a 1%. O material foi mantido em banho-maria em ebulição pelo período de uma hora. O material foi filtrado com bomba à vácuo, por meio de cadinhos filtrantes. Durante a filtração do material, foram adicionados 50 mL de ácido acético a 10% para a neutralização do NaOH e a filtração procedeu-se com a adição de água destilada quente. O material foi seco em estufa a 105 °C por 24 h. O cálculo da porcentagem de solubilidade desta análise foi feito pela seguinte fórmula:

$$\text{Solubilidade em NaOH (\%)} = [(A - B) / A] \times 100$$

onde:

A = massa inicial da amostra seca (g)

B = massa seca da amostra após o processo da extração (g)

4.4.3 Teor de extrativos totais

Este método tem por objetivo determinar o teor total de substâncias extraíveis da madeira, seguindo como referência a norma NBR 14853 (2010).

A extração foi realizada utilizando-se solução de tolueno/etanol, na proporção de 2:1 (V/V). A análise se deu com extrator de Soxhlet e balões de fundo chato, em bateria de extração, pelo período de 8 h.

Após a extração em tolueno/etanol e secagem da amostra, a serragem foi submetida à extração em etanol a 95%, utilizando-se de extrator de soxhlet e bateria de extração pelo período de 6 h.

Após a secagem, o material foi transferido para frascos de Erlenmeyer, onde foram adicionados 500 mL de água destilada e levados ao banho-maria em ebulição por uma hora. O material foi filtrado com bomba à vácuo, por meio de cadinhos filtrantes, porosidade 2 e seco em estufa a 105 °C pelo período de 24h. O cálculo dos extrativos totais se deu de acordo com a fórmula:

$$\text{Teor de extrativos totais (\%)} = (A - B) / A$$

onde:

A = massa inicial da amostra seca (g)

B = massa da amostra seca após o procedimento de extração (g)

4.4.4 Lignina

Após a remoção total dos extrativos da madeira, a análise do teor de lignina insolúvel em ácido pode ser realizada. A determinação de lignina foi realizada de acordo com Gomide e Demuner (1986) para a lignina insolúvel em ácido.

Amostras de 0,3 g de madeira livre de extrativos foram transferidas para frascos de Erlenmeyer de 250 mL. Em seguida, foram adicionados 3 mL de solução de ácido sulfúrico a 72%. O material foi mantido em banho-maria a 30 ± 2 °C por uma hora, mantendo-se frequentemente a agitação com bastão de vidro. Após este período, adicionou-se 84 mL de água destilada quente. Os frascos Erlenmeyer foram devidamente tampados com papel alumínio e papel Kraft e autoclavados a 121 °C e

1 atm por uma hora e 40 minutos. O material foi filtrado, em cadinhos filtrantes revestidos com filtro de fibra de vidro, com 700 mL de água destilada quente até a completa remoção do ácido. Os cadinhos foram mantidos em estufa a 105 °C por 24 h. Para o cálculo da análise de lignina insolúvel em ácido, procedeu-se o seguinte cálculo:

$$\text{Teor de lignina (\%)} = (B / A) \times 100$$

onde:

A = massa seca da amostra inicial (g)

B= massa seca após a análise de determinação da lignina (g)

4.4.5 Holocelulose

A determinação da holocelulose se deu pela diferença entre o correspondente a 100% da amostra, menos os resultados de extrativos totais e as ligninas insolúvel e solúvel, de acordo com Sansigolo et al., (2010), como demonstra a fórmula a seguir:

$$\text{Holocelulose, \%} = 100 - (\text{extrativos totais} - \text{lignina total})$$

A principal dificuldade na análise geral da madeira se dá no fato de que as macromoléculas da parede celular se encontram numa associação ultraestrutural e química muito íntima. Nas etapas intermediárias da análise química da madeira, porções de lignina permanecem com os polissacarídeos isolados e mesmo a celulose e hemiceluloses dificilmente podem ser separadas sem mudanças nas suas propriedades moleculares (KLOCK et al., 2015). Outro fato a ser considerado, é a solubilidade dos compostos encontrados. Muitos compostos podem ser solubilizados em diversos solventes, ou seja, podem ser solúveis em água, solventes orgânicos e álcali (MARTINS et al., 2013).

Como as análises realizadas neste estudo tratam-se de metodologias apenas quantitativas, foi possível somente a elaboração de hipóteses sobre a atividade dos fungos em questão. Os padrões encontrados nesta presente pesquisa devem ser elucidados por meio de metodologias qualitativas, como a determinação dos carboidratos, por meio cromatográfico, presentes na amostra.

4.5 ANÁLISE DOS DADOS

Para as análises e avaliação dos resultados deste presente estudo foram submetidos inicialmente ao teste de *Grubb's* para verificar a ocorrência de *outliers*. A análise de variância foi realizada e o teste de *Bartlett* foi aplicado para verificar a homogeneidade de variância e a normalidade dos dados. Quando detectada pela ANOVA diferença significativa entre os tratamentos, foi empregado o teste de *Tukey* para comparação de médias, em nível de 5% de significância. Os testes foram realizados pelo programa estatístico "*Statgraphics Centurion XVI*". As correlações de *Spearman* foram determinadas para o ensaio de perda de massa entre os fatores madeira (cerne e alburno), fungos (*T. versicolor*, *G. trabeum* e *P. placenta*) e o fator tempo. Para a análise de química, os fatores considerados para a análise estatística foram: madeira (cerne e alburno), parâmetros químicos (solubilidade em NaOH a 1%, extrativos totais, lignina total e teores de holocelulose) e tempo.

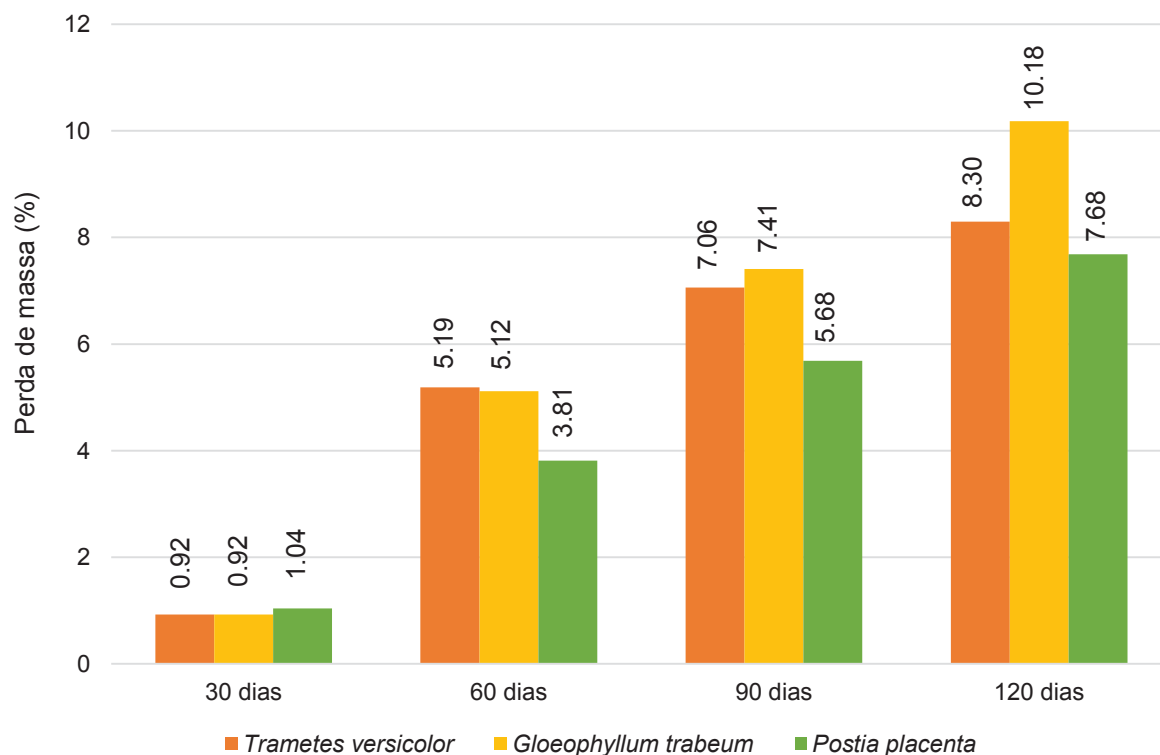
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

5.1.1 Perda de massa para madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis*

Ao se observar os valores médios de perda de massa referente à madeira de cerne (GRÁFICO 1; TABELA 14, APÊNDICE A), pôde-se verificar que os fungos *T. versicolor* e *G. trabeum* apresentaram porcentagem de degradação semelhantes ao longo do tempo. No entanto, o fungo *G. trabeum* mostrou aumento de sua atividade a partir do final de 60 dias de ensaio. O fungo *P. placenta*, apesar de se observar maior perda de massa ao final de 30 dias de deterioração, este apresentou uma evolução discreta, em relação aos demais fungos, porém, ao final do ensaio, obteve valores próximos aos resultados da madeira atacada por *T. versicolor*.

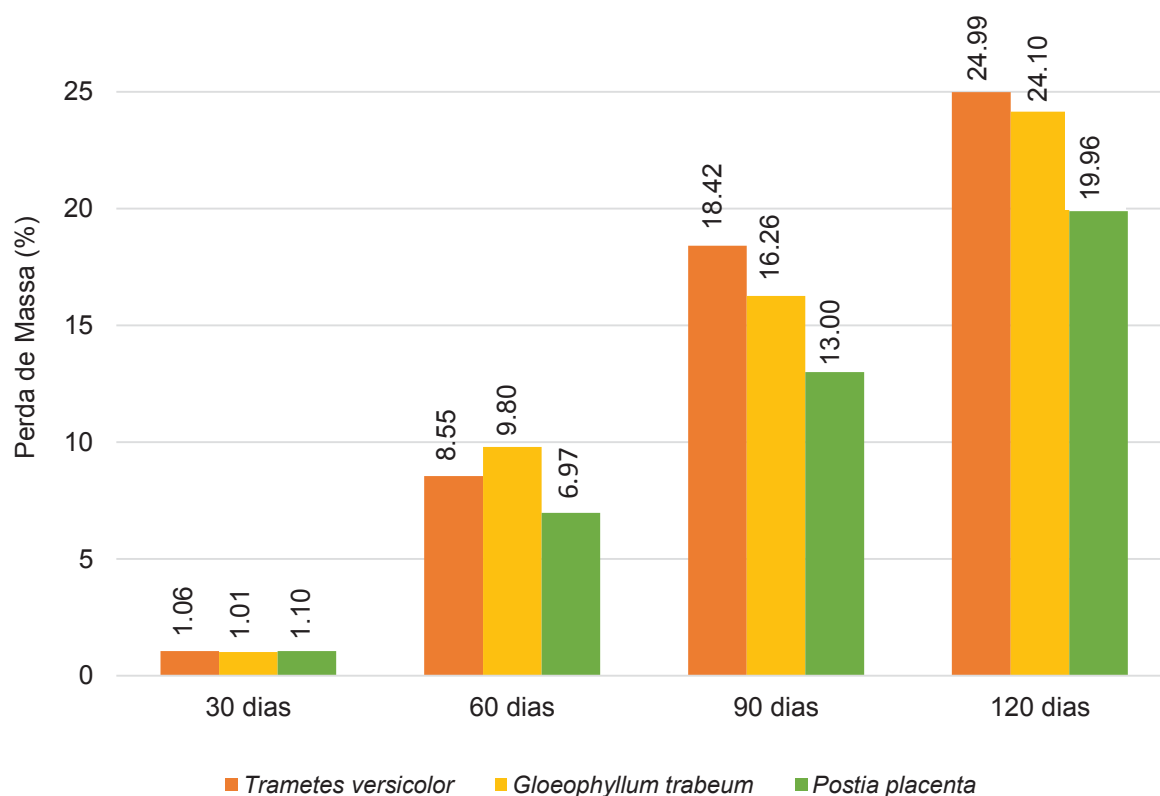
GRÁFICO 1 - PERDA DE MASSA MÉDIA PARA MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* APÓS DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AOS FUNGOS *Trametes versicolor*, *Gloeophyllum trabeum* e *Postia placenta* POR 120 DIAS



FONTE: A autora (2017).

Os valores do ensaio de perda de massa referente à madeira de alburno (GRÁFICO 2; TABELAS 14 e 15, APENDICE A) demonstraram um comportamento inversamente proporcional ao observar a deterioração provocada pelos fungos *T. versicolor* e *G. trabeum*, onde os valores se invertem a partir do final de 60 dias de ensaio. Porém, em comparação à madeira de cerne, o fungo *T. versicolor* apresentou uma perda de massa maior que o fungo *G. trabeum*. Para a madeira degradada pelo fungo *P. placenta*, a deterioração apresentou-se de maneira contínua durante o ensaio, porém, apesar de a perda de massa apresentar-se semelhante aos demais fungos ao final de trinta dias de ensaio, a mesma mostrou porcentagem menor ao final de 120 dias de deterioração.

GRÁFICO 2 – PERDA DE MASSA MÉDIA PARA MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AOS FUNGOS *Trametes versicolor*, *Gloeophyllum trabeum* e *Postia placenta* POR 120 DIAS



FONTE: A autora (2017).

WOLFSMAYR et al., (2008), ao analisarem a deterioração de madeira de teca com 15 anos de idade submetida ao fungo *T. versicolor*, observaram perda de massa de 9,1% para a madeira de cerne ao final de 120 dias, valor próximo ao resultado obtido no presente estudo, com 8,3%. Para madeira de alburno, Nagadesi et al., (2014), verificaram, ao final de 90 dias de ensaio, uma perda de massa de 18,23%, resultado também semelhante a esta pesquisa, com 18,42% de perda de massa.

Com relação ao ataque do fungo *G. trabeum*, Rosalem (2015), ao analisar o cerne de madeira de teca com idade de 20 anos, obteve valores médios de 13,93% de perda de massa ao final de 120 dias. Brocco et al., (2017) encontraram valores médios de perda de massa de 25,12% para madeira de alburno ao final de 84 dias de ensaio.

O resultado obtido nesta pesquisa referente ao fungo *P. placenta* conferiu com os observados por Motta et al., (2013) para o cerne interno, com valores médios de 7,51%. Wolfsmayr et al., (2008) encontraram valores próximos a 8% para madeira de cerne submetida ao ataque do mesmo fungo.

5.1.2 Resistência de madeira de teca de acordo com a Norma ASTM 2017–05

Os valores referentes à massa residual (TABELAS 15 e 16, APENDICE A) obtidos neste presente estudo mostram a elevada durabilidade natural da madeira de teca, inclusive no que se refere à madeira de alburno. A TABELA 2 demonstra a classificação de resistência de madeira de teca de acordo com a Norma ASTM 2017–05:

TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DE RESISTÊNCIA AO ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO APÓS 120 DIAS DE ACORDO COM A NORMA ASTM D - 2017 (2005)

FUNGOS	CERNE				ALBURNO			
	M.R.	D.P.	C.V.	Classificação	M.R.	D.P.	C.V.	Classificação
<i>Trametes versicolor</i>	91,70	1,45	1,58	Altamente resistente	75,01	2,13	10,44	Moderadamente resistente
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	89,82	2,76	3,08	Resistente	75,84	4,16	17,97	Moderadamente resistente
<i>Postia placenta</i>	92,32	1,06	1,14	Altamente resistente	80,11	3,97	19,26	Resistente

FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: M.R. (%) - Massa residual média ao final de 120 dias de ensaio.

D.P. – Desvio padrão

C.V. – Coeficiente de variação

Com relação ao valor de massa residual referente à madeira de cerne deteriorada por *G. trabeum*, embora a Norma ASTM 2017- 05 o classifique como resistente, o mesmo encontrou-se muito próximo ao valor considerado como altamente resistente de 90%, portanto, pode-se considerar que a madeira de cerne apresentou-se como altamente resistente para os três fungos utilizados no presente estudo.

Rosalem (2015) pôde observar a mesma classificação em seu trabalho analisando a madeira de *T. grandis* submetida ao ataque das mesmas espécies de fungos deste estudo. Brocco et. al., (2017), apesar de ter verificado o cerne de madeira de teca como altamente resistente aos três fungos, observaram um aumento considerável de perda de massa referente ao fungo *G. trabeum* com relação às demais espécies pesquisadas em seu trabalho. Ambos os estudos também observaram o fungo *G. trabeum* como mais agressivo, seguido pelo *T. versicolor* e *P. placenta*.

A resistência natural da madeira de teca se deve à presença de compostos quinônicos presentes em seus extrativos, particularmente a tectoquinona e a naftoquinona (THULASIDAS; BHAT, 2007). Brocco et al., (2016) verificaram, ao realizar testes de inibição de crescimento em placa de Petri contendo maltose ágar e

extrato aquoso de cerne de teca com idade de 20 anos, a total inibição de crescimento do fungo *P. placenta* nas concentrações de 4% e 8% de extrato. Os mesmos autores, ao tratar a madeira de alburno de teca com idade de 10 anos com uma mistura (1:1) de extrato aquoso a 4% e extrato alcoólico de mesma concentração, verificaram resultados significativos em ensaio de deterioração acelerada com os fungos *P. placenta*, *G. trabeum*, *N. lepideus*. Apenas o fungo *T. versicolor* apresentou maior resistência ao tratamento. Rudman (1958), ao estudar a relação da tectoquinona com a durabilidade natural da madeira afirmou que a tectoquinona possui pouca ação contra o fungo *T. versicolor*. Tal constatação não foi observada no presente estudo.

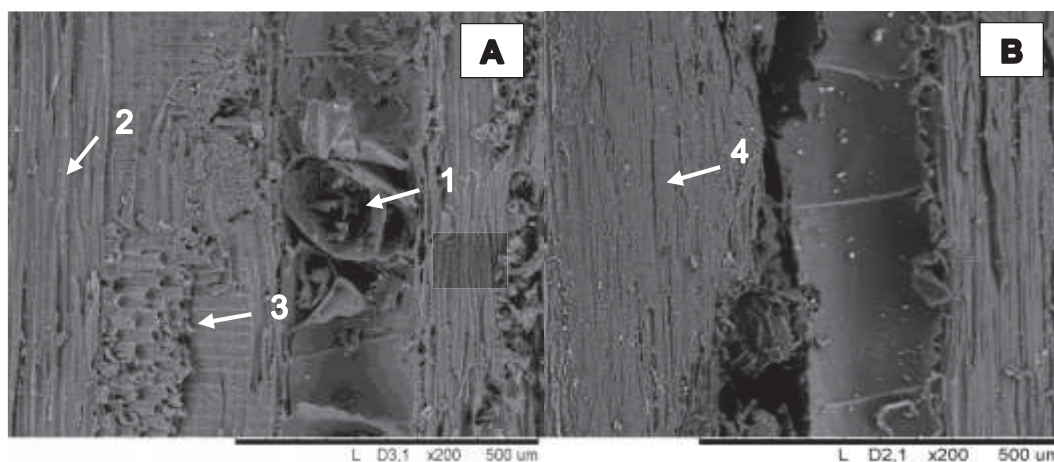
Os fungos apodrecedores produzem as enzimas quinona redutase e quinona oxiredutase (AGUIAR; FERRAZ, 2011), enzimas que agem de forma secundária no processo oxidativo de biodegradação dos compostos lignocelulósicos por compostos de baixa massa molecular e enzimas ligninolíticas, porém não foram encontrados estudos relacionando a interação da atividade de tais enzimas com as quinonas presentes na madeira de teca.

5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

5.2.1 Madeira sem deterioração

Ao se verificar as imagens da madeira de teca sem deterioração (FIGURA 18), em aumento de 200x, a madeira de cerne (A) destaca-se a presença de tilos no interior do vaso (A1), fibras íntegras e em formato libriforme (A2). As células do raio apresentam-se de forma multisseriada e homogênea (A3). Na madeira de alburno (B) pode-se observar a linearidade das fibras (B4), assim como também a integridade dos elementos vasculares e das células do parênquima.

FIGURA 18 - CORTES TANGENCIAIS DE MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* SEM DETERIORAÇÃO



FONTE: A autora (2017).

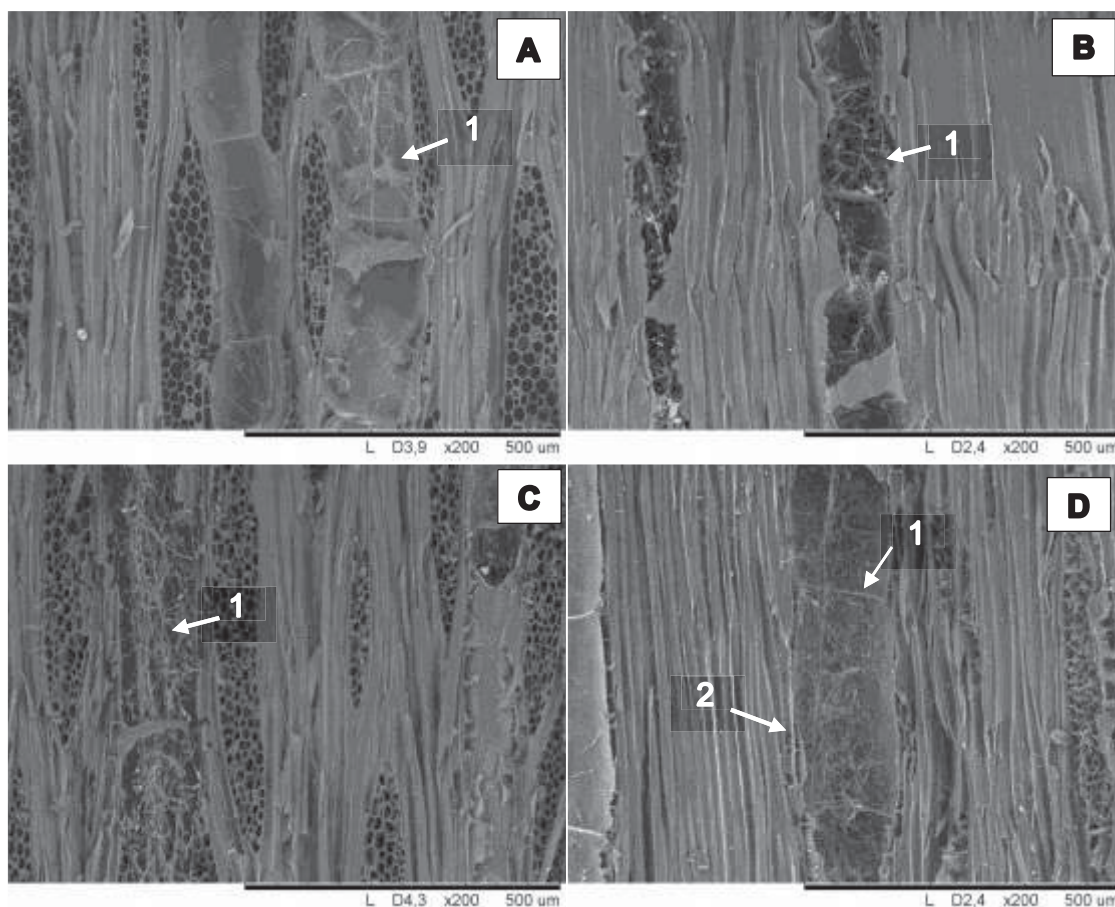
LEGENDA: A – Madeira de cerne
 B – Madeira de alburno
 1 – Obstrução do lume dos vasos por tilos
 2 – Fibras em formato libriforme
 3 – Células do raio multisseriadas
 4 – Fibras lineares
 200x (500 µm)

Tais observações conferem com os resultados obtidos por Chagas et al., (2014), para madeira de teca de 13 anos, com exceção da presença de tilos no interior dos vasos. Porém, de acordo com Tsoumis (1991) a presença de tilos é descrita como característica comum da madeira de *T. grandis*. Com o aumento das imagens observadas neste estudo, não foi possível observar a presença de septos nas fibras.

5.2.2 *Trametes versicolor*

Ao final de 30 dias de deterioração por *T. versicolor* (FIGURA 19), as imagens dos cortes de madeira de cerne mostraram o desenvolvimento das hifas limitadas ao interior dos vasos (A1 e B1), sem o comprometimento dos elementos vasculares. Nos vasos da madeira de alburno observou-se colonização abundante das hifas (C1 e D1). Também foi possível observar discretas perfurações transversais nas células próximas aos vasos (D2).

FIGURA 19 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Trametes versicolor* APÓS 30 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



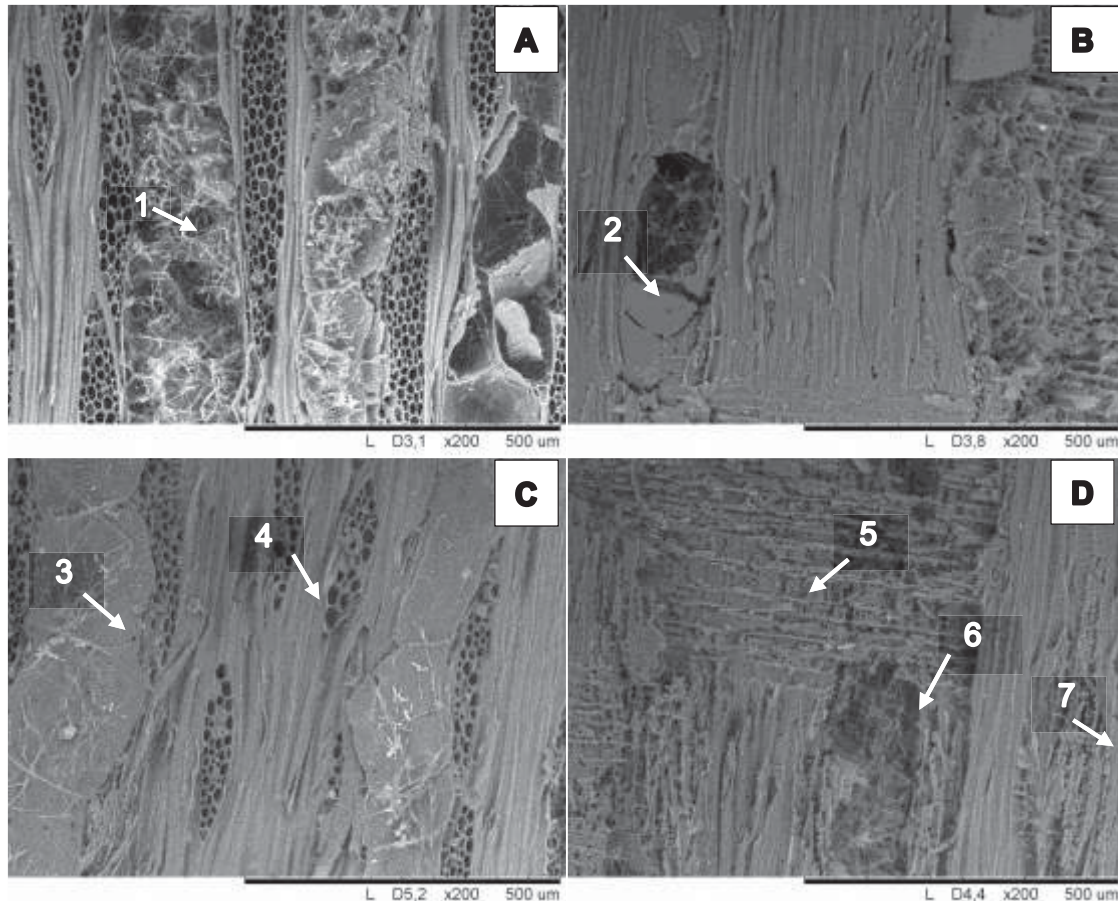
FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: A – Madeira de cerne: corte tangencial
 B – Madeira de cerne: corte radial
 C – Madeira de alburno: corte tangencial
 D – Madeira de alburno: corte radial
 1 – Colonização dos vasos por hifas
 2 – Perfurações transversais próximas ao vaso
 200x (500 μm)

Ao final de 60 dias de ensaio com o fungo *T. versicolor* (FIGURA 20), ao se observar as imagens da madeira de cerne (A e B) pôde-se verificar o preenchimento total dos vasos pelas hifas (A1), com pouco comprometimento dos elementos vasculares. As imagens relacionadas ao corte radial (B), mostraram o aumento do diâmetro de algumas pontoações situadas nas paredes do vaso (B2). O corte tangencial de madeira de alburno (C), pôde-se verificar a penetração das hifas através das pontoações dos vasos (C3) e também a diminuição da espessura das paredes das células do parênquima (C4). Foi possível observar a deterioração estrutural da madeira de alburno em corte radial (D). As células do parênquima radial e os

elementos vasculares foram deteriorados (D5 e D6), assim como grande parte das fibras (D7).

FIGURA 20 – MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Trametes versicolor* APÓS 60 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



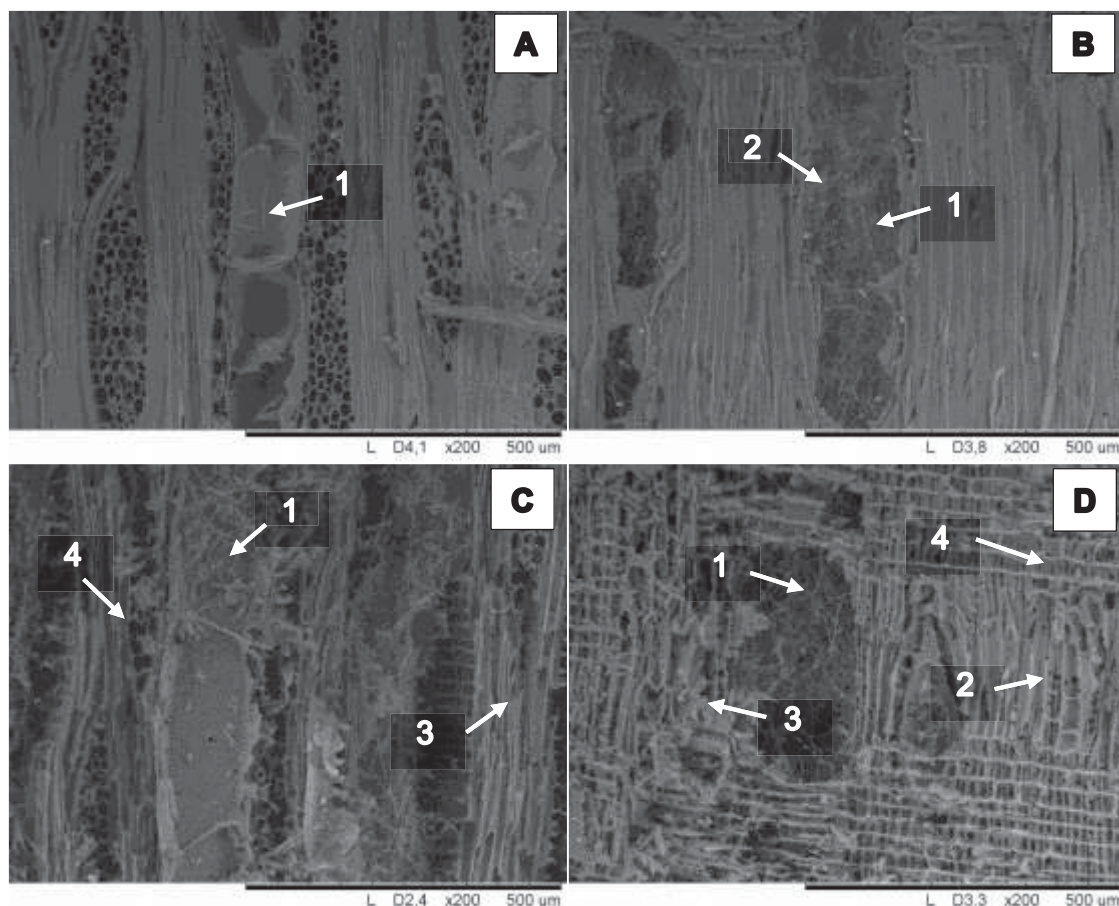
FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne corte radial.
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 – Vasos preenchidos por hifas
 2 – Aumento do diâmetro das pontoações
 3 – Hifas nas pontoações dos vasos
 4 – Células do parênquima alteradas
 5 – Deterioração das células do parênquima
 6 – Deterioração dos elementos vasculares
 7 – Deterioração das fibras
 200X (500 μm).

A microscopia realizada após 90 dias de ensaio (FIGURA 21) na madeira de cerne (A e B), as hifas limitaram-se ao interior dos vasos (A1 e B1). Grande parte das células referentes à madeira de alburno (C e D) foram deterioradas. A desestruturação das fibras (C3 e D3) e fraturas nas células do parênquima (C4 e D4) foram verificados

em ambos os cortes. A presença de hifas nos elementos vasculares também foi observada (C1 e D1). Presença de perfurações transversais nas paredes das fibras foi observada na madeira de cerne e de alburno (B2 e D2).

FIGURA 21 – MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Trametes versicolor* APÓS 90 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



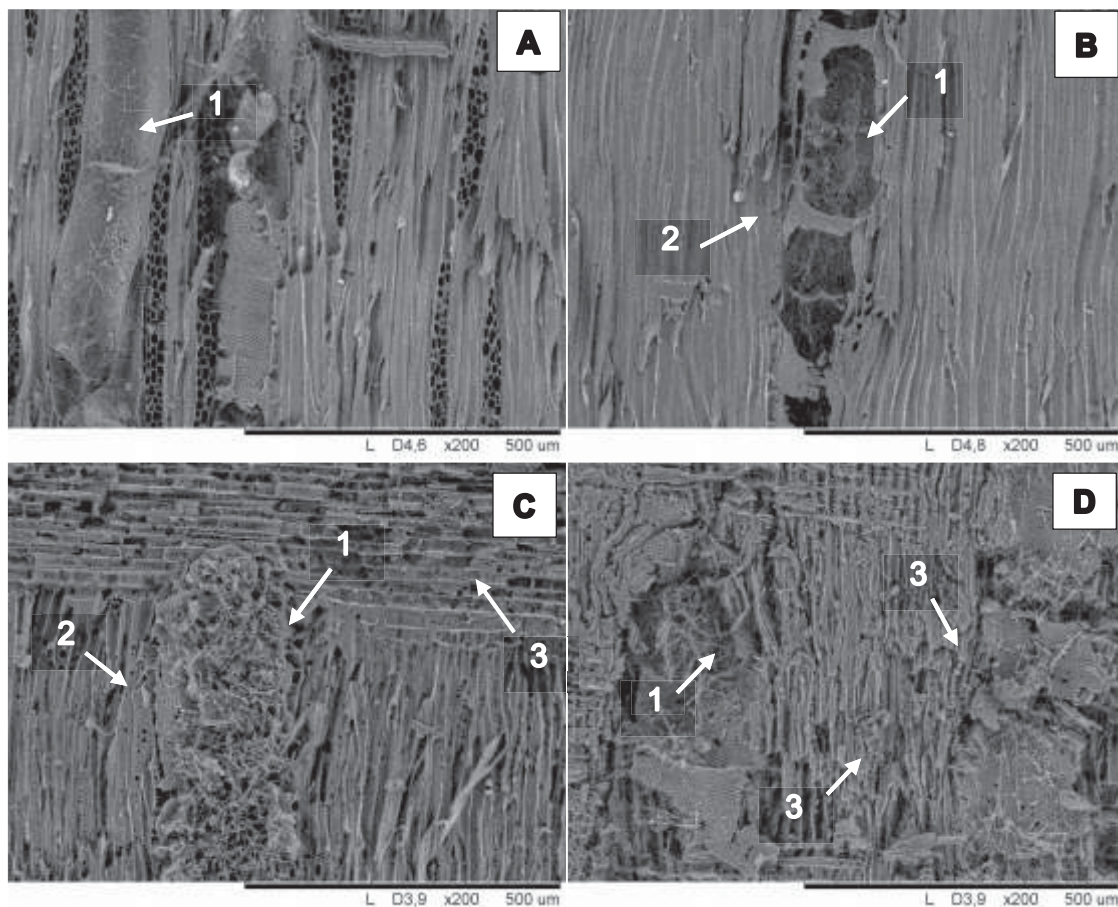
FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne: corte radial.
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial.
 1 – Hifas no interior dos vasos
 2 – Perfurações transversais à parede celular
 3 – Desestruturação das fibras
 4 – Fraturas nas células do parênquima
 200X (500 μm).

Ao final do ensaio, ou seja, ao final de 120 dias de deterioração (FIGURA 22), a madeira de cerne (A e B) deteriorada pelo fungo *T. versicolor* mostrou presença considerável de hifas no interior dos vasos (A1 e B1) e discretas perfurações transversais nas regiões adjacentes aos vasos (B2). A madeira de alburno (C e D)

apresentou total deterioração das células do lenho. Ao observar ambos os cortes, verificou-se a presença de um aglomerado maior de hifas onde anteriormente haviam elementos vasculares (C1 e D1). Perfurações transversais à parede celular tanto das células do parênquima quanto nas fibras puderam ser verificados (A2 e B2), assim como a completa deterioração celular (C3 e D3).

FIGURA 22 - MADEIRA DE CERNE E ALBUENO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Trametes versicolor* APÓS 120 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Hifas nos elementos vasculares
 2 - Perfurações transversais à parede celular
 3 - Deterioração de fibras e parênquima
 200X (500 μm).

Nagadesi et al., (2013), ao analisarem a madeira de alburno de teca submetida ao mesmo fungo observaram, ao final de 42 dias de ensaio, elevada deterioração da estrutura celular da madeira, com destaque às células do parênquima radial. Os autores também verificaram o colapso das estruturas vasculares e das fibras adjacentes devido à ação do fungo.

Wolfsmayr et al., (2008), ao realizar ensaio de deterioração de madeira de teca com idade de 15 anos, observaram, ao final de 90 dias, o desenvolvimento abundante de hifas em todo o tecido da madeira de alburno, assim como estreitamento das paredes de suas fibras e também perfurações transversais às paredes das fibras. Os mesmos autores verificaram a presença de um número menor de hifas e pouca deterioração ao observar o ataque referente à madeira de cerne, confirmando assim os resultados deste presente estudo.

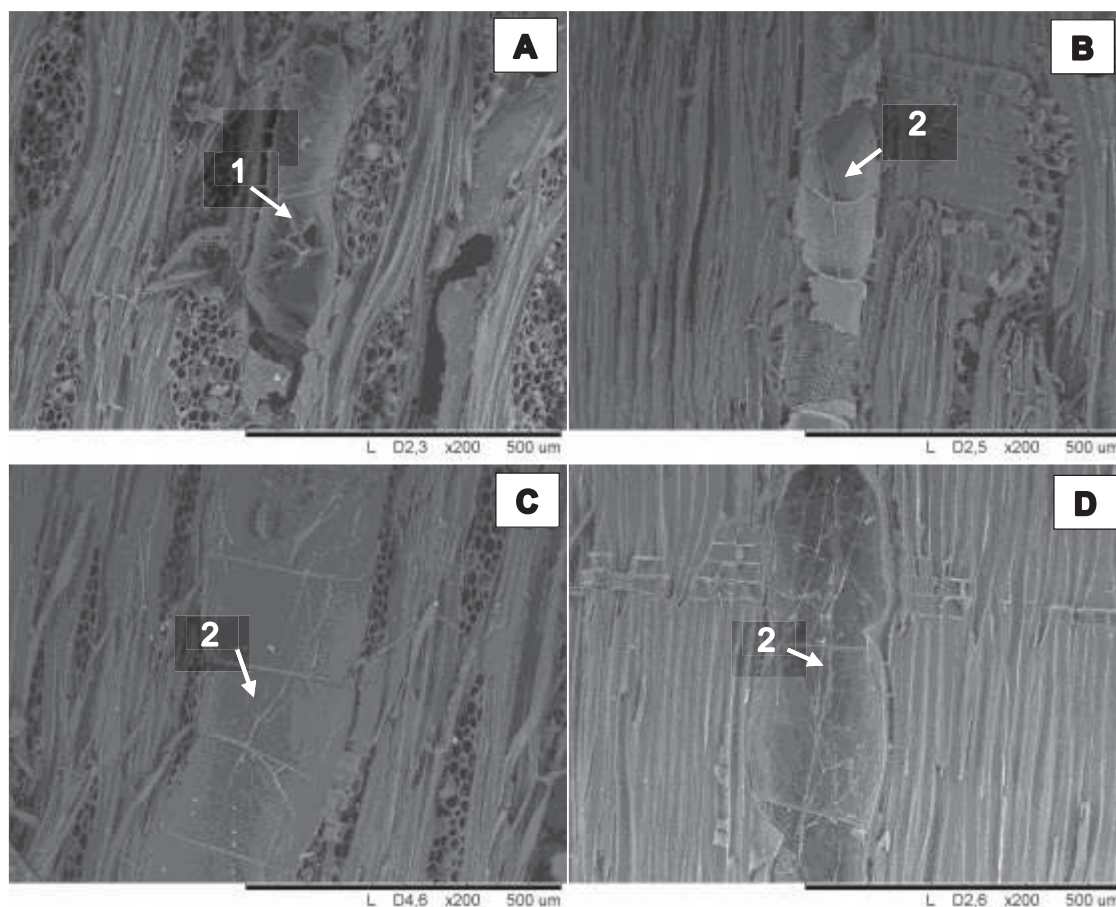
Bari et al., (2018), ao observar imagens de madeira de *Fagus orientalis* Lipsky. Greuter & Burdet ao final de 120 dias de ensaio, verificaram a completa deterioração das células do parênquima radial, assim como também a severa decomposição dos componentes estruturais de suas fibras e vasos. Em semelhante artigo, Bari et al., (2016), ao analisar a madeira de *F. orientalis* após 120 dias de exposição ao *T. versicolor*, observaram elevada deterioração das fibras, assim como maior concentração de hifas nos vasos e observação de perfurações transversais, provocadas por atividade enzimática.

LEÃO et al (2017), em seu estudo sobre resistência natural de madeira de amescla (*Trattinnickia burseraefolia* W.) puderam observar, ao final de 120 dias de ensaio, a superfície da madeira totalmente colonizada por hifas, com destaque nas células do parênquima, apresentando elevada deterioração. As imagens dos autores também demonstraram perfurações transversais na parede celular das fibras.

5.2.3 *Gloeophyllum trabeum*

A colonização da madeira de teca por *G. trabeum* após 30 dias de ensaio (FIGURA 23), mostrou o início da colonização da madeira de cerne (A e B), com a obstrução do lume dos vasos por tilos (A1) e uma única hifa encontrada na porção central do vaso na imagem do corte radial (B2). Em ambos os cortes de madeira de alburno, verificou-se a presença de poucas hifas (C2 e D2) e células sem indícios de deterioração.

FIGURA 23 - MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Gloeophyllum trabeum* APÓS 30 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

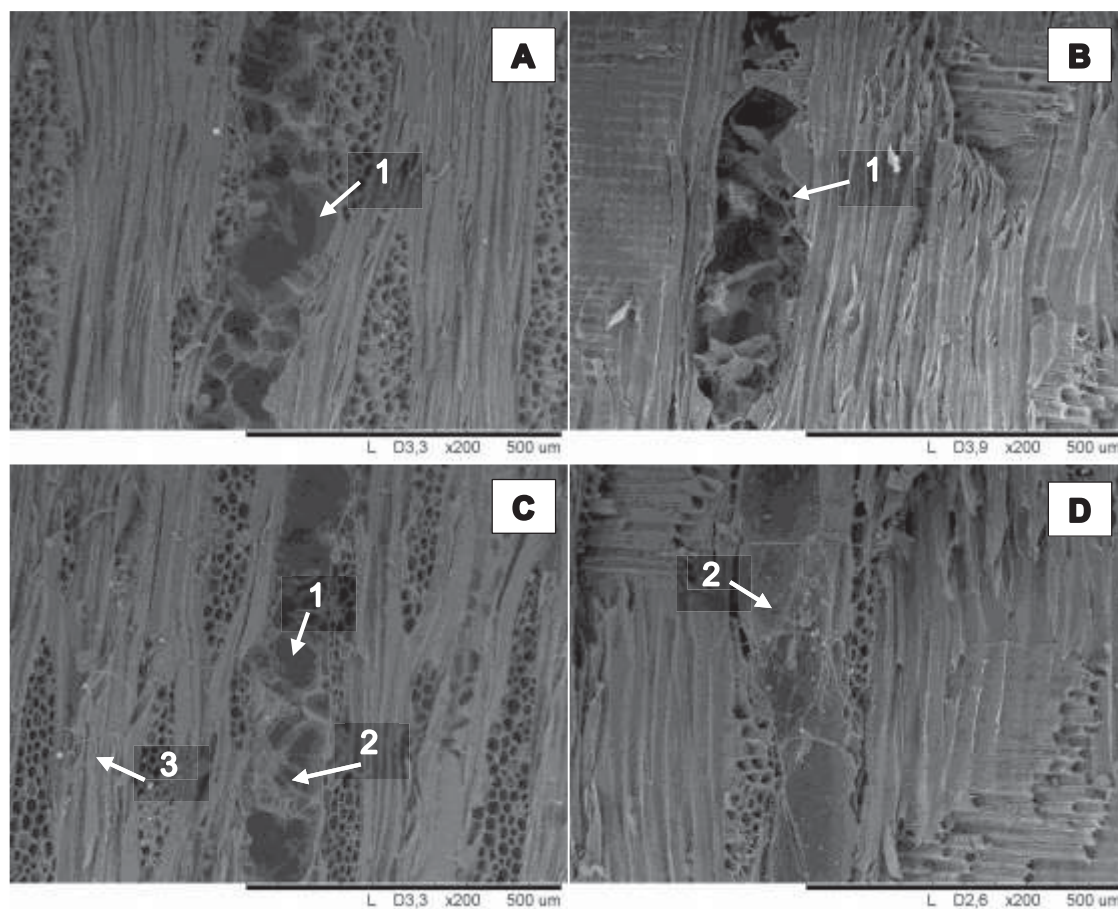


FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Obstrução do lume dos vasos por tilos
 2 - Hifas no interior dos vasos
 200X (500 μm).

Nas imagens verificadas ao final de 60 dias de deterioração (FIGURA 24), não se observou nenhum sinal de colonização ou de comprometimento da estrutura celular nos cortes de madeira de cerne (A e B), apenas a presença de obstrução do lume dos vasos por tilos (A1 e B1). Ocorreu uma discreta colonização no interior dos vasos da madeira de alburno (C2 e D2) e poucas hifas presentes nas fibras do corte tangencial (C3). As estruturas celulares permaneceram sem deterioração aparente.

FIGURA 24 - MADEIRA DE CERNE E ALBUENO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Gloeophyllum trabeum* APÓS 60 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



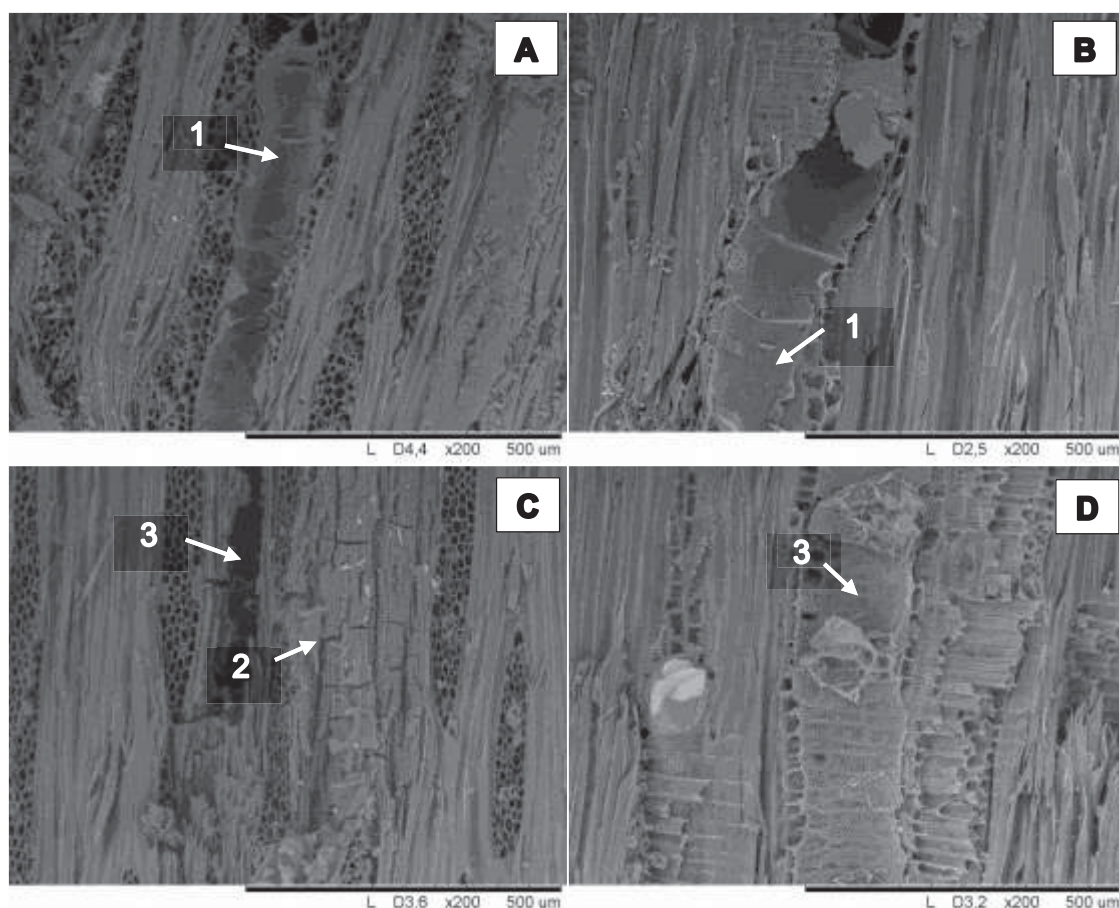
FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Obstrução do lume dos vasos por tilos
 2 - Hifas no interior dos vasos
 3 - Presença de hifas nas fibras
 200X (500 μm).

Ao analisar as imagens referentes a 90 dias de deterioração (FIGURA 25) causada pelo fungo *G. trabeum* foi observada a presença de raras hifas. Tal observação coincidiu com o surgimento de basidiocarpos na observação macroscópica no mesmo período (FIGURAS 9B e 10A), o que pode indicar que este fungo apresentou um ciclo de vida mais curto em comparação aos demais. As imagens realizadas de madeira de cerne (A e B) mostraram a presença de poucas hifas no interior dos vasos, sem maiores alterações nas células do lenho. Verificou-se grande deterioração nos cortes de madeira de alburno (C e D). No corte tangencial (C), as fibras apresentaram severa deterioração (C2), elementos vasculares

deteriorados (C3). No corte radial (D), ainda foi possível observar vasos e suas pontuações, porém, a desestruturação dos elementos vasculares apresentou-se bastante avançada (D3).

FIGURA 25 – MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Gloeophyllum trabeum* APÓS 90 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



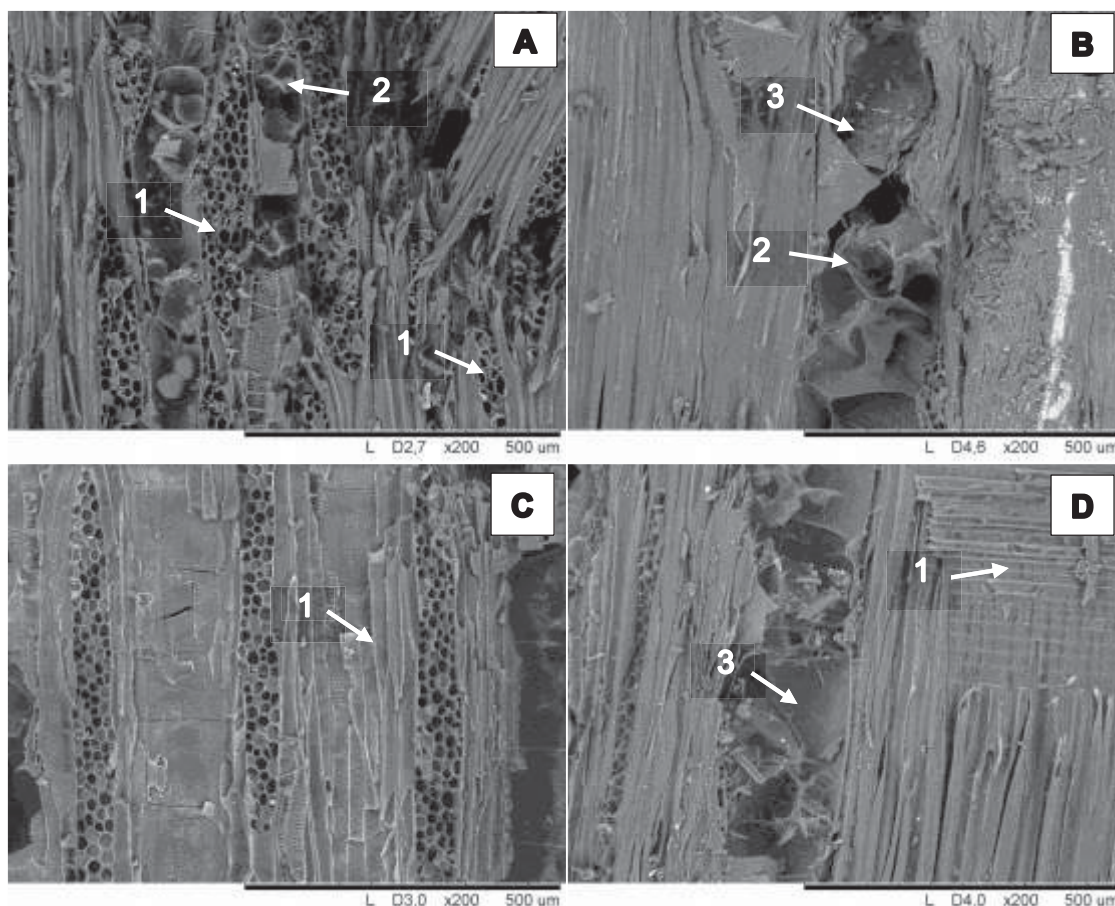
FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne: corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Presença de hifas
 2 - Fraturas transversais às fibras
 3 - Elementos vasculares deteriorados
 200X (500 μm).

A microscopia realizada ao final de 120 dias de ensaio (FIGURA 26) para madeira de cerne (A e B), foi observada deterioração na parede das fibras e alterações morfológicas das células do parênquima no corte tangencial (A1) e presença de obstrução do lume dos vasos por tilos nas imagens referentes de ambos os cortes (A2 e B2). As imagens realizadas em madeira de alburno (C e D) mostraram deterioração

das fibras ao se observar o corte tangencial (C1). Também pôde-se observar a presença de poucas hifas (D3) e deterioração das células do parênquima (D1) no corte radial.

FIGURA 26 – MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Gloeophyllum trabeum* APÓS 120 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne: corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Fibras e células do parênquima deterioradas
 2 - Obstrução do lume dos vasos por tilos
 3 - Hifas no interior dos vasos
 200X (500 μm).

Daniel et al., (2007), verificaram o ataque do mesmo fungo e observaram, ao final de 21 dias, a presença de hifas no lúmen das fibras de madeira de *Betula verrucosa* Ehrh. KUO et al., (1988) verificaram as mesmas características microscópicas observadas neste presente estudo ao observar o ataque de *G. trabeum* em madeira de *Populus deltoides* W. Bartram ex Marshall, porém, tais apontamentos

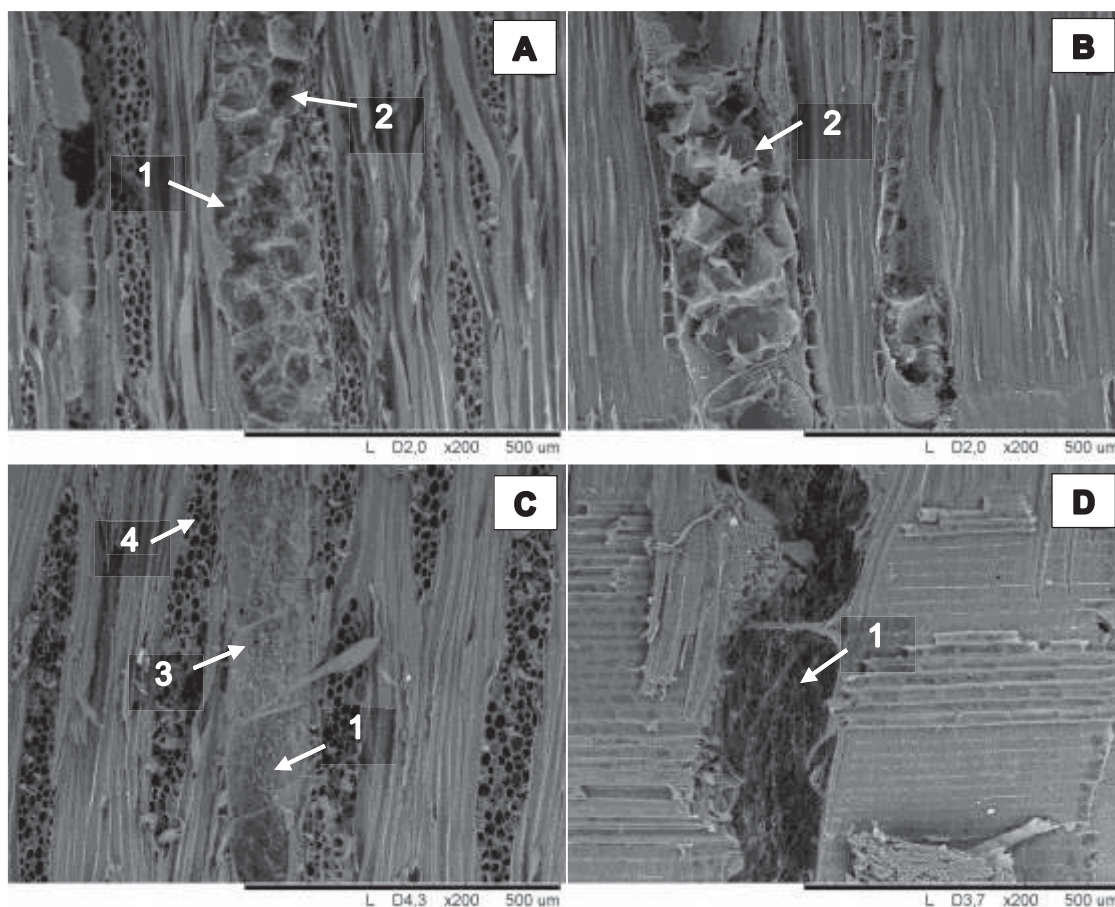
foram feitos ao final de 15 dias de deterioração. De acordo com os mesmos autores, ao final de 30 dias de ensaio, os corpos de prova se encontraram tomados por hifas, com predominância nas células do parênquima e fibras adjacentes aos vasos. As células do parênquima apresentaram relevante deterioração. O mesmo fungo apresentou comportamento diferente na avaliação de Wahab et al., (2012) em madeira de acácia híbrida ao final de 90 dias de exposição ao fungo, onde foi observada uma presença de hifas em maior concentração nos vasos.

Daniel et al., (2007), ao analisar o ataque de *G. trabeum* em madeira de *B. verrucosa* ao final de 120 dias de ensaio, observaram o colapso de suas fibras e células do parênquima.

5.2.4 *Postia placenta*

As imagens da madeira de teca deteriorada pelo fungo *P. placenta*, ao final de 30 dias de ensaio (FIGURA 27), indicou presença abundante de hifas nos cortes tangenciais de madeira de cerne (A1) e obstrução do lume dos vasos por tilos em ambos os cortes, tangencial e radial (A2 e B2). Em madeira de alburno (C e D), além da observação de hifas (C1 e D1), o aumento no diâmetro das pontoações dos vasos também foi verificado (C3), porém, sem o comprometimento aparente das estruturas celulares, a não ser pelas leves alterações na morfologia das células do parênquima, já indicando o estreitamento de suas paredes (C4).

FIGURA 27 – MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Postia placenta* APÓS 30 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

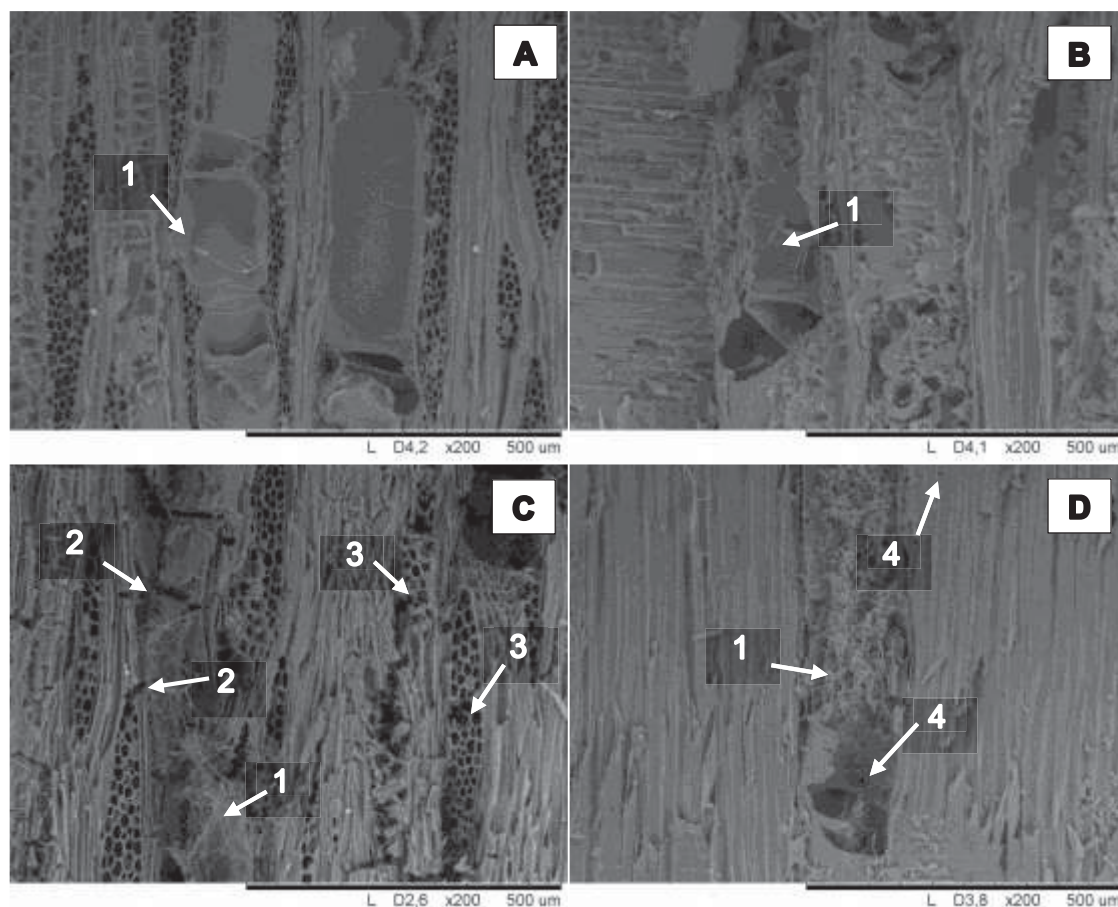


FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Hifas no interior dos vasos
 2 - Obstrução do lume dos vasos por tilos
 3 - Aumento do diâmetro das pontoações
 4 - Células do parênquima alteradas
 200X (500 μm).

A madeira de teca após 60 dias de colonização pelo fungo *P. placenta* (FIGURA 28), apresentou pouca colonização limitada apenas ao interior dos vasos nas imagens referentes à madeira de cerne (A1 e B1). Verificou-se considerável grau de deterioração quando observadas as imagens de madeira de alburno (C e D). Em seu corte tangencial (C), foi possível verificar a presença de hifas nos elementos celulares (C1 e D1) e fraturas transversais nas fibras (C2). As células do parênquima apresentaram considerável deterioração (C3). Perfurações transversais puderam ser observadas nas fibras do corte radial (D4).

FIGURA 28 – MADEIRA DE CERNE E ALBUNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Postia placenta* APÓS 60 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

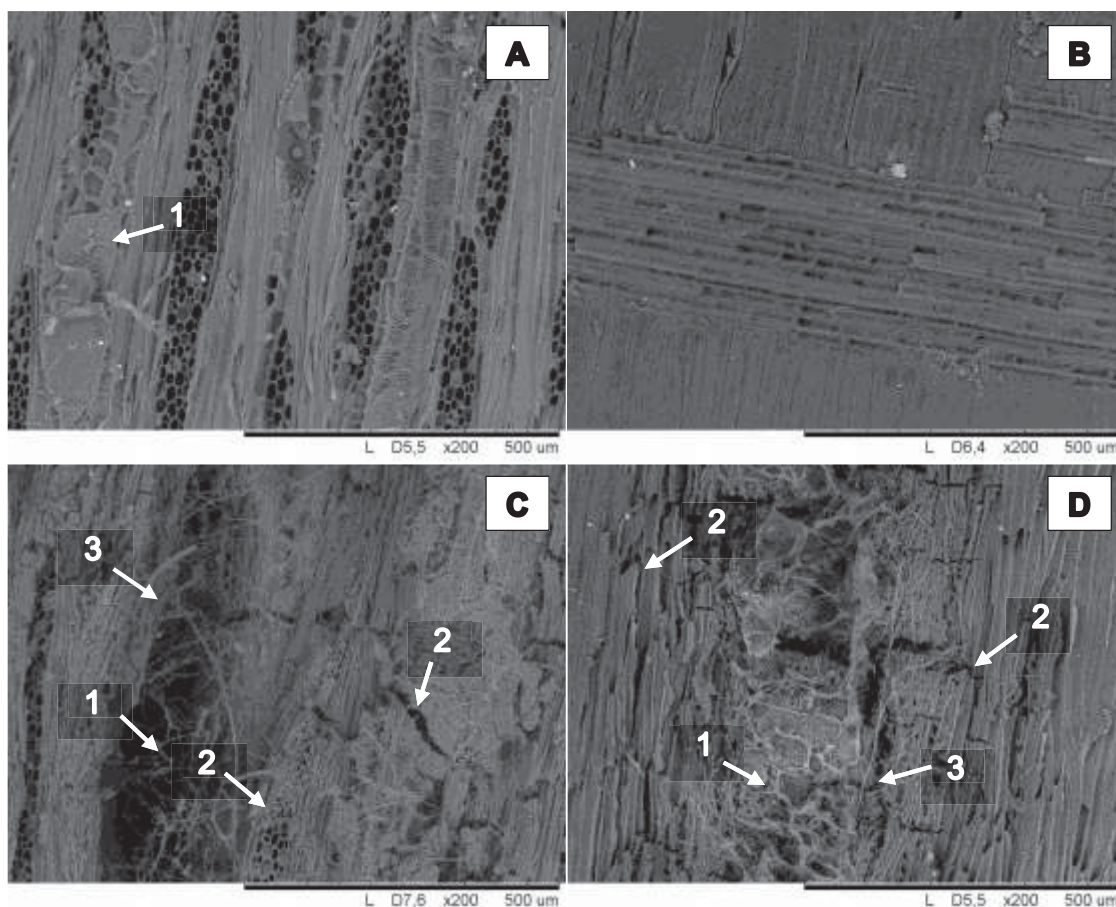


FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne: corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Hifas no interior dos vasos
 2 - Fibras com fissuras transversais
 3 - Células do parênquima deterioradas
 4 - Perfurações transversais
 200X (500 μm).

Após 90 dias de colonização pelo fungo *P. placenta* (FIGURA 29), a estrutura da madeira de cerne (A e B) permaneceram levemente alteradas, com a presença de poucas hifas nas imagens referentes ao corte tangencial (A1). A madeira de alburno (C e D) apresentou severa deterioração em sua estrutura celular. As fissuras transversais e colapso das fibras se destacaram no corte tangencial e radial (C2 e D2), assim como a deterioração total dos elementos vasculares (C3 e D3).

FIGURA 29 – MADEIRA DE CERNE E ALBUENO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Postia placenta* APÓS 90 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

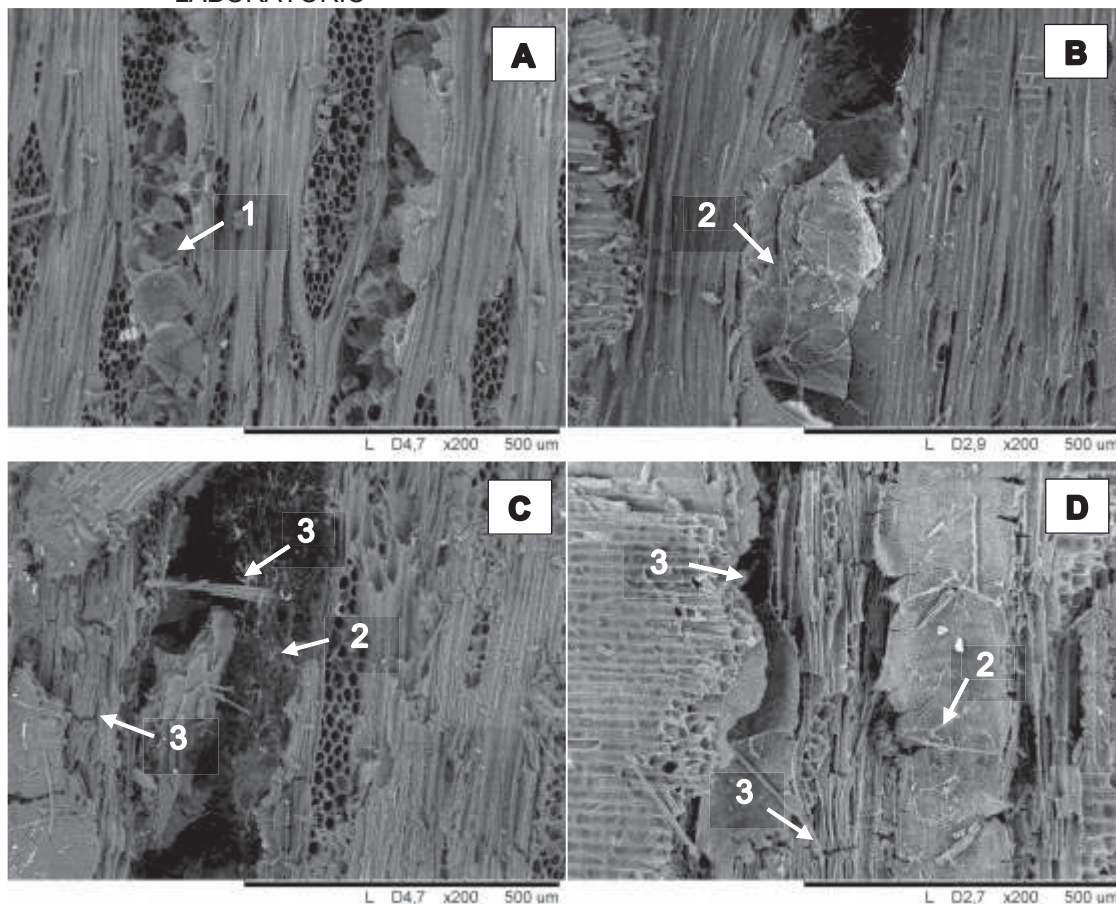


FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne: corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Hifas nos elementos vasculares
 2 - Fibras e células do parênquima deterioradas
 3 - Elementos vasculares deteriorados
 200X (500 μm).

Após 120 dias de ensaio com o fungo *P. placenta* (FIGURA 30), com relação à madeira de cerne (A e B), observou-se a presença de obstrução do lume dos vasos por tilos (A1). Presença de hifas nos elementos vasculares foi observada (B2). Nas imagens de madeira de alburno (C e D), além da observação de hifas nos elementos vasculares (C2 e D2), também verificou-se o colapso da estrutura do lenho das amostras analisadas, com elevada deterioração das fibras e elementos vasculares (C1 e D1).

FIGURA 30 – MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* ATACADA POR *Postia placenta* APÓS 120 DIAS DE ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO



FONTE: A autora (2017).

LEGENDA: A - Madeira de cerne: corte tangencial
 B - Madeira de cerne: corte radial
 C - Madeira de alburno: corte tangencial
 D - Madeira de alburno: corte radial
 1 - Obstrução dos vasos por tilos
 2 - Hifas no interior do vaso
 3 - Fibras e elementos vasculares deteriorados
 200X (500 μm).

Murace et al., (2006), ao submeter a madeira de três espécies de Salgueiro ao fungo *Coriollarius malicola* Berk & M.A. Curtis verificaram, após 75 dias de deterioração, a presença de fissuras nas paredes dos vasos e fibras, porém, as células do parênquima radial não apresentaram alterações significativas. Os mesmos autores também observaram a presença de hifas em todos os elementos celulares. Embora a madeira de Salgueiro seja considerada de baixa resistência natural, os mecanismos de ataque de ambos os fungos apresentam grande semelhança, assim como também os resultados de ambas as microscopias realizadas. KIM et al., (2015), ao analisar o

comportamento deste mesmo fungo em madeira de *Fraxinus excelsior* L. ao final de 70 dias também puderam observar uma maior resistência das células do parênquima à deterioração em comparação com as fibras, que se apresentaram mais deterioradas.

Skyba et al., (2013), ao observar a deterioração de madeira de *Populus* L. transgênico submetido a este mesmo fungo após o quarto mês de ensaio, observaram a presença de raras hifas, porém toda a estrutura do lenho demonstrou-se deteriorada. Murace et al., (2006), ao submeter a madeira de três espécies de Salgueiro ao fungo *C. malicola* verificaram, após 150 dias de deterioração, o colapso total da estrutura celular, com fissuras nas fibras, assim como o estreitamento de suas paredes e perda de sua forma.

De um modo geral, a madeira de alburno apresentou elevada deterioração de sua estrutura a partir do segundo mês de ensaio para a ação dos fungos *T. versicolor* e *P. placenta*, porém, o fungo *G. trabeum* deteriorou a madeira de alburno apenas ao final de 90 dias de ensaio. Wilcox (1993), ao verificar o ataque dos fungos *P. placenta* e *G. trabeum* em madeira de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco e *Abies concolor* (Gord. & Glend.) Lindl. ex Hildebr também pôde observar a deterioração tardia da madeira provocada pelo fungo *G. trabeum*. Foi possível observar perfurações transversais às paredes celulares, fissuras nas fibras e deterioração das células do parênquima na madeira atacada pelos três fungos pesquisados. Em relação a madeira de cerne, estas apresentaram discretos sinais de deterioração para todos os fungos, exceto para o fungo *G. trabeum*, que se apresentou mais agressivo, causando maior grau de deterioração.

De acordo com Higuchi (1985), a microscopia eletrônica de varredura, através de suas imagens tridimensionais, trata-se da melhor forma de se observar a deterioração dos componentes celulares da madeira, como fissuras nas fibras, aumento no diâmetro das pontoações e perfurações transversais às paredes celulares, assim como também a melhor visualização das hifas fúngicas.

Zabel; Morrell (1992) descreveram como características do estágio inicial da deterioração da madeira a presença de perfurações transversais às paredes das fibras, assim como a erosão da parede celular e estreitamento da parede das células do parênquima. Blanchette (1979) afirmou que, as perfurações transversais e fissuras encontradas durante o processo de deterioração podem indicar seu avanço, haja vista que, quanto maior o número de perfurações e fissuras, mais avançado se encontra o

estágio de deterioração. Wilcox (1993) afirmou que a observação do aumento do diâmetro das perfurações enzimáticas transversais indicam o avanço da deterioração da madeira ao longo do tempo, assim como a separação de suas células. Porém, deve-se levar em consideração ao observar as fissuras transversais deste presente estudo, assim como a separação celular, que esses danos podem ter ocorrido no momento do preparo das amostras para a realização das imagens, pois a fragilidade dos corpos de prova no momento do corte apresentaram-se evidentes. Por tais motivos, a separação celular observada nas imagens deste presente estudo não foram descritas.

5.3 ANÁLISES QUÍMICAS DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE TECA

As análises químicas realizadas durante o ensaio de resistência natural da madeira de teca foram observadas de acordo com o agente responsável pela biodeterioração e a degradação de seus componentes verificadas de acordo com a solubilidade dos compostos formados durante tal processo.

5.3.1 *Trametes versicolor*

Ao verificar os resultados das análises químicas referentes à deterioração de cerne por *T. versicolor* (TABELA 3), uma discreta elevação nos valores de solubilidade em NaOH a 1 % pôde ser verificada ao final de trinta dias de ensaio, em comparação com a madeira sem ataque (controle), porém, não houve elevação significativa após esse período.

Uma diminuição dos teores de extrativos totais foi observado ao final de 60 dias de exposição da madeira ao fungo, seguido por gradual elevação ao final de 90 e 120 dias, porém permaneceram abaixo do valor obtido para a madeira sem deterioração (controle).

Ao final de 60 dias de deterioração, houve uma considerável diminuição dos teores de holocelulose e consequente elevação do valor de lignina total. Ao final de 90 e 120 dias, o percentual de holocelulose apresentou discreta elevação, assim como a diminuição gradual dos valores numéricos de lignina.

TABELA 3 – QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO *Trametes versicolor*, POR 120 DIAS.

Parâmetros Químicos	<i>Trametes versicolor</i>				
	Controle (madeira sem deterioração)	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Solubilidade em NaOH 1%	17,40 B	19,14 A	19,18 A	19,21 A	19,37 A
Extrativos totais	9,35 A	8,86 A	6,11 B	6,19 B	9,09 A
Lignina total	35,65 D	36,98 C	46,73 A	37,98 B	36,49 C
Holocelulose	55,00 B	54,15 C	47,16 D	55,83 A	54,42 C

FONTE: A autora (2017).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Os resultados correspondentes à deterioração de madeira de alburno por *T. versicolor* (TABELA 4), pôde-se observar que, valores referentes à solubilidade em NaOH a 1% demonstraram pouca elevação ao final de 30 dias de ensaio, com aumento progressivo de seu percentual até o final do processo. O teor de extrativos totais apresentou elevação gradual ao longo do tempo.

Com relação aos valores de holocelulose observados, verificou-se um significativo declínio ao final de 60 dias, assim como a consequente elevação do valor de lignina total, comportamento semelhante ao apresentado na madeira de cerne. Ao final das duas últimas coletas, verificou-se discreta elevação nos teores de holocelulose, e consequente diminuição dos valores numéricos de lignina.

TABELA 4 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO *Trametes versicolor*, POR 120 DIAS

Parâmetros químicos	<i>Trametes versicolor</i>				
	Madeira sem deterioração	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Solubilidade em NaOH 1%	15,56 E	15,73 D	19,24 C	19,82 B	22,46 A
Extrativos totais	6,83 C	5,52 D	6,85 C	10,60 B	11,12 A
Lignina Total	36,04 C	36,36 C	44,39 A	37,57 B	36,19 C
Holocelulose	57,13 B	58,12 A	48,76 E	51,82 D	52,69 C

FONTE: A autora (2017)

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

À medida em que o processo de deterioração avança, os teores de solubilidade ao NaOH a 1% se elevam gradualmente, indicando a presença de celulose degradada e compostos de baixa massa molecular solúveis em álcali, como alguns extrativos e hemicelulose degradada (PETTERSEN, 1984).

Ao final de 30 dias de ensaio, verificando os baixos teores de extrativos totais, onde se encontram compostos fenólicos de menor massa molecular, pode-se sugerir a diminuição de tais compostos pela ação de enzimas ligninolíticas, em particular as lacases. Tal enzima trata-se de uma fenoloxidase não específica (ARANTES; MILAGRES, 2009) e de baixo potencial de redução (MARTINEZ, 2005) que possui a capacidade de oxidar diversos compostos fenólicos de baixa massa molecular. Camarero et al., (2007) indicaram um possível envolvimento de produtos da deterioração da lignina e extrativos fenólicos de baixa massa molecular como mediadores naturais de ação das lacases durante o processo de biodegradação por fungos de podridão branca. Lekounougou (2008) verificou uma intensa atividade de lacases durante os estágios iniciais da deterioração de madeira de *Fagus sylvatica* L. submetida ao fungo *T. versicolor*.

A elevação nos teores de extrativos totais ao longo do tempo indica a formação de compostos de baixa massa molecular solúveis em água quente e solventes orgânicos, como açúcares simples provenientes da degradação da holocelulose por ação de celulasas e hemicelulasas (SÁNCHEZ, 2008) e compostos

fenólicos e aromáticos resultantes da decomposição da lignina (CHRISTOPHER et al., 2014). Também deve-se levar em consideração, ao verificar o teor de extrativos totais, a produção de compostos de baixa massa molecular produzidos por fungos, que auxiliam o complexo enzimático a degradar compostos lignocelulósicos (AGUIAR; FERRAZ, 2011). Janjusevic et al., (2018) ao analisarem os extrativos do micélio de *T. versicolor*, encontraram um total de 38 compostos fenólicos diferentes, além de ácidos como ácidos gálico, p – cumárico e caféico.

O aumento no teor de lignina total foi relacionado a modificações na estrutura química da madeira. Isso poderia ser interpretado como a diminuição dos teores da celulose e hemiceluloses causando um conseqüente aumento numérico relativo no conteúdo de lignina (SCHMIDT, 2006), ou seja, os valores de lignina total não foram alterados, o que não significa que não houve degradação deste composto pelo fungo *T. versicolor* ao longo do tempo, apenas indica que a lignina pode não ter sido degradada ao ponto de se solubilizar em solventes utilizados neste presente estudo.

Como pôde-se observar neste fungo, não houve uma redução considerável do teor de holocelulose ao longo do tempo para madeira de cerne, com exceção da coleta referente ao final de 60 dias. Uma intensa atividade hidrolítica ocorre nos intervalos entre o primeiro e o segundo mês de deterioração, indicando, ao final de 60 dias, a degradação da lignina, a ação de celulasas, hemicelulasas e conseqüente diminuição nos teores de holocelulose. Bari et al., (2016) ao analisar a química da madeira de *Fagus orientalis* L. submetida ao ataque de *T. versicolor* observaram um decréscimo de holocelulose até o final de 45 dias de ensaio, seguido por uma discreta elevação ao final do segundo mês. Tal parâmetro se apresentou estável e sem alterações significativas até o final de 120 dias.

A degradação da holocelulose está intimamente ligada aos teores de solubilidade em NaOH a 1% e com os teores de extrativos totais, uma vez que o primeiro parâmetro indica a formação de radicais livres solúveis em álcali e o segundo à fase final do processo de degradação de tais compostos, onde pode-se encontrar a presença de açúcares simples provenientes de sua total degradação (PETTERSEN, 1984).

Embora o fungo *T. versicolor* seja classificado como um fungo não seletivo (SCHMIDT, 2006), neste presente estudo o mesmo apresentou um comportamento seletivo, porém, um mesmo fungo pode apresentar as duas formas de degradação em regiões diferentes da madeira (ERICKSSON; BLANCHETTE; ANDER, 1990). Fatores

como umidade, temperatura e pH podem influenciar na seletividade dos fungos de podridão branca (NADIR, et al., 2019). Nishida et al., (1988) desenvolveram um cálculo do fator de seletividade para os fungos ligninolíticos, que compreende a razão entre o teor de lignina total e o teor de holocelulose.

Shirkavand et al., (2017), ao analisar a deterioração de *Pinus radiata*. Realizada pelo mesmo fungo constataram um fator de seletividade à lignina elevado nos primeiros 21 dias de ensaio. Bari et al., (2016), ao analisar a resistência natural de *Fagus orientalis* L. submetida ao ataque de *T. versicolor* não observaram degradação significativa nos valores de lignina em 120 dias de ensaio, com maior eficiência nos primeiros 30 dias de deterioração. Recomenda-se a determinação de tal fator para a confirmação da atividade excepcionalmente seletiva.

5.3.2 *Gloeophyllum trabeum*

Ao se observar os resultados dos ensaios químicos referentes à deterioração da madeira de cerne (TABELA 5), houve uma diminuição da solubilidade em NaOH 1% ao final de 30 dias de deterioração e uma elevação nos meses referentes a 60, 90 e 120 dias. Uma elevação dos teores de compostos provenientes da degradação da madeira solúveis em NaOH a 1% foi observada apenas ao final do ensaio (120 dias).

A porcentagem de extrativos totais demonstraram certa diminuição no que se refere a primeira coleta, seguido por uma elevação ao final do ensaio, indicando a presença de produtos da deterioração final dos compostos lignocelulósicos. Uma elevação relativa nos valores da lignina total pôde ser observada.

Com relação aos teores de holocelulose, não se verificou perda com valores significativos nos primeiros meses de ensaio. Tal perda só foi observada ao final de 90 e 120 dias de deterioração.

TABELA 5 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO *Gloeophyllum trabeum* POR 120 DIAS

Parâmetros químicos	<i>Gloeophyllum trabeum</i>				
	Madeira sem deterioração	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Solubilidade em NaOH 1%	17,40 B	14,13 D	16,22 C	16,26 C	22,34 A
Extrativos totais	9,35 B	5,87 D	8,45 C	8,37 C	10,05 A
Lignina Total	35,65 E	39,53 B	36,46 D	38,53 C	41,24 A
Holocelulose	55,00 A	54,60 A	55,09 A	53,10 B	48,71 C

FONTE: A autora (2017).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Com relação à química da deterioração de madeira de alburno por *G. trabeum* (TABELA 6), as análises referentes a solubilidade ao NaOH a 1% descrevem uma deterioração constante dos compostos lignocelulósicos degradados solúveis em álcali ao longo do tempo, ou seja, compostos decorrentes do estágio inicial do processo de biodeterioração. Por outro lado, a concentração de extrativos totais apresentou-se significativa apenas ao final do ensaio, o que coincide com a considerável perda de holocelulose verificada neste período, indicando a degradação dos carboidratos à açúcares simples, fase final do processo de hidrólise.

De acordo com os resultados apresentados, não houve degradação de lignina total e sim apenas alterações numéricas relativas. Com relação a porcentagem de holocelulose encontrada, observou-se uma discreta elevação ao final de 60 dias e diminuição gradual nos valores referentes a 90 e 120 dias. Em comparação à madeira não deteriorada, todas as coletas apresentaram considerável diminuição, deste composto, com destaque para o final do ensaio.

TABELA 6 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO *Gloeophyllum trabeum* POR 120 DIAS

Parâmetros químicos	<i>Gloeophyllum trabeum</i>				
	Madeira sem deterioração	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Solubilidade em NaOH 1%	15,56 E	17,65 D	20,11 C	23,48 B	25,05 A
Extrativos totais	6,83 C	6,78 C	7,17 B	6,67 D	10,05 A
Lignina Total	36,04 D	39,46 B	37,27 C	39,80 B	41,26 A
Holocelulose	57,13 A	53,76 C	55,56 B	53,53 C	48,69 D

FONTE: A autora (2017).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Além da atividade enzimática, os fungos lignocelulolíticos ainda contam com a produção de diversos compostos de baixa massa molecular para auxílio no processo de deterioração (AGUIAR; FERRAZ, 2011). Os fungos *G. trabeum* e *P. placenta*, embora possuam genes produtores de lacases (D'SOUZA et al., 1996), contam com um sistema extracelular redutor de Fe^{3+} , por meio da produção de metoxihidroquinonas (hidroquinona – quinona), produzindo H_2O_2 . Tais reações geram o sistema Fenton, que é baseado na reação entre peróxidos (normalmente H_2O_2) e ferro, em meio ácido, para a formação de oxigênio reativo, principalmente o radical hidroxila (ARANTES; MILAGRES, 2009), que permite a deterioração de uma grande variedade de compostos orgânicos (JENSEN et al., 2001). As metoxihidroquinonas são produzidas principalmente nos estágios iniciais da deterioração e decaem à medida que a deterioração da madeira progride (ZHANG et al., 2016). A reação de Fenton, juntamente com a ação enzimática do fungo, é capaz de degradar celulose, hemicelulose e lignina e também pode ser encontrada em fungos de podridão branca (ARANTES et al., 2010).

5.3.3 *Postia placenta*

No que se refere à química da deterioração provocada pelo fungo *P. placenta* em madeira de cerne (TABELA 7), a solubilidade em NaOH a 1% apresentou um leve decréscimo ao final de 30 dias de ensaio, comparada à madeira sem deterioração,

porém, uma elevação e estabilização foi observada nas demais coletas. A porcentagem de extrativos totais demonstrou um decréscimo ao final de 30 e 60 dias de deterioração e uma elevação com valores semelhantes ao final de 90 e 120 dias. Tais valores indicam, além de hemicelulose e celulose degradadas, uma elevação na concentração de açúcares simples e compostos de baixa massa molecular resultantes da degradação enzimática. Os teores de lignina total apresentaram valores semelhantes até o final de 60 dias, com elevação relativa ao final das duas últimas coletas. Quanto a porcentagem de holocelulose durante este ensaio, seus teores demonstram-se baixos ao final da primeira coleta em comparação com a madeira sem deterioração. Um discreto aumento foi verificado ao final de 60 dias, com diminuição de suas concentrações ao final de 90 e 120 dias.

TABELA 7 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO *Postia placenta* POR 120 DIAS

Parâmetros químicos	<i>Postia placenta</i>				
	Madeira sem deterioração	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Solubilidade em NaOH 1%	17,40 C	15,86 D	21,40 B	22,60 A	21,08 B
Extrativos totais	9,35 D	11,73 A	11,52 A	10,92 B	10,11 C
Lignina Total	35,65 D	36,65 C	35,84 D	39,93 B	40,82 A
Holocelulose	55,00 A	51,62 C	52,06 B	50,52 D	49,07 E

FONTE: A autora (2017)

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

A madeira deteriorada pelo fungo *P. placenta* (TABELA 8) apresentou valores significativos de celulosas e hemicelulosas degradadas a partir do final de 60 dias, permanecendo praticamente constante após este período, comportamento semelhante ao de madeira de cerne submetida a este mesmo fungo.

Os valores referentes ao teor de extrativos totais apresentaram elevação ao final de 30 dias, valores estáveis ao final da segunda e terceira coletas, com porcentagem máxima ao final de 120 dias. Tais valores são consistentes com o processo de biodeterioração da madeira por fungos, indicando uma elevação de

açúcares simples e compostos fenólicos de baixa massa molecular decorrentes de tal processo. A degradação da holocelulose apresenta um declínio constante ao longo do ensaio.

TABELA 8 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO SUBMETIDA AO FUNGO *Postia placenta* POR 120 DIAS

Parâmetros químicos	<i>Postia placenta</i>				
	Madeira sem deterioração	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
Solubilidade em NaOH 1%	15,56 E	19,55 D	32,21 B	32,34 B	33,62 A
Extrativos totais	6,83 D	7,16 C	9,53 B	9,55 B	15,28 A
Lignina Total	36,04 D	36,35 D	37,44 C	40,76 B	44,20 A
Holocelulose	57,13 A	56,49 B	53,03 C	49,69 D	40,52 E

FONTE: A autora (2017).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

Zhang et al., (2016) afirmaram que o fungo *P. placenta* apresenta um mecanismo de dois passos: oxidativo e hidrolítico e que tais processos são realizados em tempos diferentes, tornando o processo oxidativo como um pré-tratamento natural anterior à hidrólise de carboidratos. Yelle et al., (2011) afirmaram que o mecanismo de auxílio à biodeterioração de compostos lignocelulolíticos produzidos pelo fungo *P. placenta* também se trata de uma reação de Fenton. O mesmo autor afirma que as condições oxidantes promovidas por esta reação, podem repolimerizar a lignina, porém, basta uma despolimerização transitória para que se permita a infiltração das hidrolases para o acesso aos polissacarídeos. De acordo com Ericksson; Blanchette; Ander, (1990), fungos de podridão parda causam reduções baixas ou moderadas nos teores de lignina insolúvel em ácido, o que é geralmente interpretado como lignina residual do processo de deterioração. Portanto, neste presente estudo, nenhum fungo demonstrou deteriorar a lignina insolúvel em ácido.

Para melhor visualização dos resultados obtidos, a TABELA 9 dispõe os resultados das análises químicas por parâmetro e fungos ao longo do tempo:

TABELA 9 - QUÍMICA DA DETERIORAÇÃO DE MADEIRA DE *Tectona grandis* (%) APÓS ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Solubilidade em NaOH a 1%											
MADEIRA DE CERNE											
FUNGOS	Controle	Madeira de cerne						Madeira de alburno			
		30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	
<i>Trametes versicolor</i>	17,40 B	19,14 A	19,18 A	19,21 A	19,37 A	15,56 E	15,73 D	19,24 C	19,82 B	22,46 A	
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	17,40 B	14,13 D	16,22 C	16,26 C	22,34 A	15,56 E	17,65 D	20,11 C	23,48 B	25,05 A	
<i>Postia placenta</i>	17,40 C	15,86 D	21,40 B	22,60 A	21,08 B	15,56 E	19,55 D	32,21 B	32,34 B	33,62 A	
Teor de extrativos totais (%)											
MADEIRA DE CERNE											
Fungos	Controle	Madeira de cerne						Madeira de alburno			
		30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	
<i>Trametes versicolor</i>	9,35 A	8,86 A	6,11 B	6,19 B	9,09 A	15,56 E	15,73 D	19,24 C	19,82 B	22,46 A	
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	9,35 B	5,87 D	8,45 C	8,37 C	10,05 A	9,35 B	5,87 D	8,45 C	8,37 C	10,05 A	
<i>Postia placenta</i>	9,35 D	11,73 A	11,52 A	10,92 B	10,11 C	6,83 D	7,16 C	9,53 B	9,55 B	15,28 A	
Lignina total (%)											
MADEIRA DE CERNE											
Fungos	Controle	Madeira de cerne						Madeira de alburno			
		30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	
<i>Trametes versicolor</i>	35,65 D	36,98 C	46,73 A	37,98 B	36,49 C	36,04 C	36,36 C	44,39 A	37,57 B	36,19 C	
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	35,65 E	39,53 B	36,46 D	38,53 C	41,24 A	36,04 D	39,46 B	37,27 C	39,80 B	41,26 A	
<i>Postia placenta</i>	35,65 D	36,65 C	35,84 D	39,93 B	40,82 A	36,04 D	36,35 D	37,44 C	40,76 B	44,20 A	
Teor de holocelulose (%)											
MADEIRA DE CERNE											
Fungos	Controle	Madeira de cerne						Madeira de alburno			
		30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	Controle	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias	
<i>Trametes versicolor</i>	55,00 B	54,15 C	47,16 D	55,83 A	54,42 C	57,13 B	58,12 A	48,76 E	51,82 D	52,69 C	
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	55,00 A	54,60 A	55,09 A	53,10 B	48,71 C	57,13 A	53,76 C	55,56 B	53,53 C	48,69 D	
<i>Postia placenta</i>	55,00 A	51,62 C	52,06 B	50,52 D	49,07 E	57,13 A	56,49 B	53,03 C	49,69 D	40,52 E	

FONTE: A autora (2019).

NOTA: As médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na horizontal, dentro de cada fator, não diferem entre si (Tukey, $p > 0,05$).

De um modo geral, todos os fungos analisados nesta presente pesquisa degradaram alguma porcentagem de holocelulose. Porém, pôde-se observar uma deterioração desse composto menor que a esperada ao longo do tempo. Tal constatação se deve ao fato de que a madeira de teca possui uma concentração de lignina considerada elevada em comparação a outras folhosas (CHAGAS et al., 2014). Nos tecidos lignocelulósicos, a resistência à deterioração da holocelulose é proporcional ao teor de lignina. Martínez (2005) afirmou que a lignina é altamente resistente à deterioração biológica. Tal resistência é atribuída à menor acessibilidade à holocelulose pelos sistemas enzimáticos promovida pelo maior teor de lignina presente na madeira (LEPAGE, 1986). Porém, a determinação da lignina como resíduo, como a realizada neste presente estudo, trata-se da metodologia inadequada para a determinação da lignina degradada enzimaticamente. Para isso, seria necessária a determinação da lignina enzimática, descrita por Fengel, D., Wegener, G., (1984).

6 CONCLUSÃO

O ensaio de deterioração acelerada em laboratório demonstrou que a madeira de cerne se apresentou altamente resistente aos fungos *T. versicolor* e *P. placenta* e resistente ao fungo *G. trabeum*. Com relação à madeira de alburno, esta demonstrou ser resistente ao fungo *P. placenta* e moderadamente resistente aos fungos *T. versicolor* e *G. trabeum*.

A microscopia eletrônica de varredura demonstrou que a madeira de alburno foi deteriorada por todos os fungos utilizados neste estudo. Apenas o fungo *G. trabeum* apresentou eficiência para deteriorar a madeira de cerne.

A química da deterioração da madeira mostrou que todos os fungos apresentaram atividades oxidativas e hidrolíticas ao longo do tempo. O fungo *T. versicolor* aparentou mostrar comportamento seletivo ao final de 60 dias de deterioração tanto para madeira de cerne quanto para madeira de alburno. O fungo *P. placenta* apresentou maior capacidade para degradação de holocelulose.

- Recomendações

Verificar a relação entre quinonas redutase produzidas pelos fungos apodrecedores e as quinonas presentes na madeira de teca como mecanismo de sua resistência natural.

Realizar análise qualitativa e quantitativa de carboidratos ao longo da deterioração para melhor compreensão das atividades enzimáticas e compostos de baixa massa molecular produzidos pelos fungos deste estudo.

Realizar ensaio para a determinação de lignina enzimática.

Determinar, através dos cálculos indicados, a seletividade apresentada pelo fungo *T. versicolor* observada nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGUIAR A.; FERRAZ A. Mecanismos envolvidos na biodegradação de materiais lignocelulósicos e aplicações tecnológicas correlatas. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, nº 10. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 1413-07**: Standard test method for wood preservatives by laboratory soil-block cultures. Pensilvânia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 2017-05**: Standard test method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods. Pensilvânia, 2005.

AMERICAN TYPE CULTURE COLLECTION. **ATCC**. *Gloeophyllum trabeum* (Pers: Fries) ATCC 11539. Disponível em: www.atcc.org/en/Products/All/11539. Acesso em: 05 de julho de 2016.

AMERICAN TYPE CULTURE COLLECTION. **ATCC**. *Postia placenta* (Fries) Larsen; Lombard. ATCC 11538_TT. Disponível em: www.atcc.org/Products/all/11538_TT. Acesso em: 05 de julho de 2016.

ANGELI, A. *Tectona grandis* (Teca). In: IDENTIFICAÇÃO DE ESPÉCIES FLORESTAIS. **IPEF**. Piracicaba, 2003. Disponível em: http://www.ipef.br/identificacao/tectona_grandis.asp. Acesso em: 20 out. 2016.

AOUDJI, A. K. N., et al. Teak, *Tectona grandis* L.f., planting in smallholders' farming system in southern Benin. **Bois et Forêts des Tropiques**. nº 319, 2014.

ARANTES, V.; MILAGRES, A. M. F. Relevância de compostos de baixa massa molar produzidos por fungos e envolvidos na biodegradação da madeira. **Química Nova**. São Paulo, v. 32, nº 6. 2009.

ARANTES, V. et al. Lignocellulosic polysaccharides and lignin degradation by wood decay fungi: the relevance of non enzymatic Fenton-based reactions. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**. Springer Nature, v. 38. 2011.

ARIMOTO, M. et al. Molecular breeding of lignin-degrading brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum* by homologous expression of laccase gene, **AMB Express**, v. 5, nº 81, Springer Open, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853 (2010).**

Madeira: Determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – **ABRAF**. Anuário Estatístico. 2013.

BARI, E. et al. Monitoring the cell wall characteristics of degraded beech wood by white-rot fungi: anatomical, chemical, and photochemical study, **Maderas. Ciencia y Tecnologia**. Concepción, v. 20, nº 1. 2018.

BARI, E. et al. Assessing the destructive behaviors of two white-rot fungi on beech Wood, **International Journal of Biodeterioration & Biodegradation**. v.114, Elsevier. 2016.

BELLON, K. R. R. **Modificação térmica da madeira de três espécies de florestas plantadas pelo processo vap holzsysteme®**. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 2013.

BLANCHETTE, R. A. A study of progressive stages of discoloration and decay in *Malus* using scanning electron microscopy. **Canadian journal of Forest Research**, v 9, nº4. 1979.

BLANCHETTE, R. A. et al. Cell wall alterations in loblolly pine wood decayed by the white-rot fungus, *Ceriporiopsis subvermispora*. **Journal of Biotechnology**. v. 53, Elsevier. 1997.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. London: Interscience Publishers, 1963.

BROCCO, V. F. et al. Potential of teak heartwood extracts as a natural wood preservative, **Journal of Cleaner Production**. v,142, Elsevier. 2017.

BUDZIAK, C. R. et al. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos na indústria madeireira. **Química Nova**, v. 27, n. 3, 2004.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

COLDEBELLA, R. **Caracterização das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don Ex Steud.** 87p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

CAMARERO, S. et al. Paper pulp delignification using laccase and natural mediators. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 40, Elsevier. 2007.

CARVALHO, W. et al. Uma visão sobre a estrutura, composição e biodegradação da madeira. **Química Nova**. São Paulo, v. 32, nº. 8. 2009.

CASTRO, H.F.; **Processos químicos industriais II: papel e celulose**. Lorena: Universidade de São Paulo. Série didática. 2009.

CAVALCANTE, M. S. **Deterioração biológica e preservação de madeiras** IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Divisão de Madeiras, Pesquisa e Desenvolvimento. São Paulo, 1982.

CHAGAS, S. F. **Propriedades da madeira de *Tectona grandis* (L.f.), visando a sua utilização para peças preservadas**. 78f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, 2013.

CHAGAS, S. F. Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. Pelotas, v 5, nº 2. 2014.

CHAVES, E.; FONSECA, W. Teca: *Tectona grandis* L. f. espécie de arbol de uso multiple em América Central. Turrialba: **CATIE**. 1991.

CHRISTOPHER L. P. et al. Lignin biodegradation with laccase-mediator systems. **Frontiers in energy research**, v. 2. 2014.

COLLETT O. Variation in cellulolytic activity among isolates of the woodrotting fungus *Gloeophyllum trabeum* (Pers. ex Fr.) Murr. **Mater Organismen**.1984.

DANIEL, E. et al. Characteristics of *Gloeophyllum trabeum* alcohol oxidase, an extracellular source of H₂O₂ in brown rot decay of wood. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 73, nº 19. 2007.

DENCE, C. W.; LIN, S. Y.; TIMELL, T. E. **Methods in lignin chemistry**. New York: Springer Verlag, 1992.

DONATE, P. (2014). Síntese Ambientalmente Correta a partir de Biomassa. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**. v. 6i2. 2014.

D'SOUZA, T. M. et al. Isolation of laccase gene-specific sequences from white rot and brown rot fungi by PCR. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 62, nº 10. 1996.

ERICKSSON, K.E., BLANCHETTE, R.A., ANDER, P. **Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components**. Springer. Berlin, 1990.

FENGEL, D., WEGENER, G. **Wood, chemistry, ultrastructure, reactions**. New York, Waster & Grugter, 1984.

FONSECA, S. G. C. et al. Lapachol - química, farmacologia e métodos de dosagem. **Revista Brasileira de Farmácia**, Rio de Janeiro, v. 84, 2003.

FREITAS, M. C. et al. **Diversidade de fungos macroscópicos da "reserva ecológica" do campus da UEG, Anápolis, Goiás - i: Agaricales**. In: IV CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2006, Anápolis. Universidade Estadual de Goiás. Disponível em: http://www.prp2.ueg.br/06v1/conteudo/pesquisa/inic-cien/eventos/sic2006/arquivos/biológicas/diversidade_fungos.pdf. Acesso em: 27/10/2017.

GALLETI, S. R. **Introdução a Microscopia Eletrônica**. Instituto Biológico. São Paulo, v. 65. 2003.

GARCÍA, J. A. V.; DAOUD, R. Efeitos dos antioxidantes fenólicos na prática desportiva. **Fitness & Performance Journal**, v.1, n. 4. 2002.

GAUTAM, A. K. Notes on wood rotting fungi from India (1): *T. versicolor* - the turkey tail. **Journal on New Biological Reports**. Nova Delhi, v. 2. 2013.

GOMEZ, C. A. et al. Madera, un potencial material lignocelulósico para la producción de biocombustibles en Colombia. **Información Tecnológica**. La Serena, v. 23, nº 6. 2012.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método klason modificado. **O Papel**, v. 47, n. 8. 1986.

GREEN F, HIGHLEY TL. Mechanism of brown-rot decay: paradigm or paradox. **International Biodeterioration & Biodegradation**. Elsevier, v. 39. 1997.

HIGHLEY, T. L. Cellulolytic activity of brown rot and white-rot fungi on solid media. **Holzforschung**. 1988.

HIGUCHI, N. 1979. **Informações básicas para o manejo florestal da *Tectona grandis* L.f. (TECA) introduzida no Alto Jauru**. Cuiabá: Fundação Universidade Federal de Mato Grosso/Departamento de Engenharia Florestal. 1979.

HIGUCHI, T. **Biosynthesis and Biodegradation of Wood Components**. Academic Press. Elsevier, 1985.

HIGUCHI, T. Mechanisms of lignin degradation by lignin peroxidase and laccase of white-rot fungi. **Biogenesis and biodegradation of plant cell polymers**. Washington. American Chemical Society, 1989.

HOBBS, C. R. Medicinal value of turkey tail fungus *T. versicolor* (L.:Fr.) Pilát (Aphyllphoromycetidae). A literature review*. **International Journal of Medicinal Mushrooms**, v 6. Begell House Inc. 2004.

HOPEWELL, G. Selected wood properties and potential uses for plantation teak and poumuli. ACIAR Project report FST/2007/020. **Forest Product Innovations Clarity**. State of Queensland, Department of Employment, Economic Development and Innovation, 2011.

HON, D. N. S.; SHIRAISHI, N. **Wood and cellulosic chemistry**. 2^a. ed, New York: Marcel Dekker, 2006.

HUIJSER, H. A. *T. versicolor*. Disponível em: <http://www.mycobank.org/BioloMICS.aspx?TargetKey=14682616000002126&Rec=1661>. Acesso em 02 de maio de 2016.

INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS – **IUFRO**. Utilization of planted teak. Disponível em: <https://www.iufro.org/nc/science/divisions/division-5/50000/50600/50602/>. Acesso em: 21 de julho de 2019.

JANJUŠEVIĆ et al. *Trametes versicolor* ethanol extract, a promising candidate for health-promoting food supplement. **Natural product research**. Reino Unido, v. 32, nº 8. 2018.

JENSEN J. K. et al. Pathways for extracellular fenton chemistry in the brown rot basidiomycete *Gloeophyllum trabeum*. **Applied and Environmental Microbiology**. nº 67, 2001.

KIM J. S. et al. Ultrastructure and immunocytochemistry of degradation in spruce and ash sapwood by the brown rot fungus *Postia placenta*: Characterization of incipient stages of decay and variation in decay process. **Biodeterioration & Biodegradation**, v. 103, Elsevier, 2015.

KLOCK, U. et al. **Química da Madeira**. 4. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015.

KOLLMANN, F. F. P., COTÉ, W. A. **Principles of Wood Science and Technology: Solid wood**. Universidade de Michigan, v 1. Springer-Verlag, 1968.

KUO, M. et al. Microscopy of progressive decay of cottonwood by the brown-rot fungus *Gloeophyllum trabeum*. **Journal of the Society of Wood Science and Technology**. Ames. Iowa State University. v. 20. 1988

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos**, Berlim: GTZ, 1990.

LANCEFIELD, C. S.; WESTWOOD, N.J. The synthesis and analysis of advanced lignin model polymers. **Green Chemistry**. London, v. 17. 2015.

LEÃO, R. M. et al. Efeito de tratamentos termomecânicos sobre a resistência biológica da madeira perante o ataque de fungos. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia – RIPE**, Brasília, v. 1, nº 1. 2017.

LEKOUNOUGOU, S. et al. Initial stages of *Fagus sylvatica* wood colonization by the white-rot basidiomycete *T. versicolor*. Enzymatic characterization. **International Biodeterioration & Biodegradation**. v. 61. Elsevier. 2008.

LEONARDO, F. V. S., ROCHA, H. F., & MENDOZA, Z. M. S. H. Compostos químicos em teca. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35. 2015. Disponível em: <http://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/816/440>. Acessado em: 10/09/2017.

LEPAGE, E. S. (coord.) **Manual de Preservação de Madeiras**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – Divisão de Madeiras. São Paulo, 1986.

LEPAGE, E.S. et al. **Tecnologia de proteção da madeira**. São Paulo: Montana Química, 2017.

LOBÃO, M. S. et al. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92. 2011.

LOIOLA, P. L. **Secagem da madeira de teca (*Tectona grandis* L. F) sob diferentes condições**. 219 f. Dissertação (Mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

LOPEZ, G. A.; MILANO, S. Avaliação da durabilidade natural da madeira e de produtos usados na sua proteção. In: LEPAGE, E. S. (Coord.). **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT, v.2, 1986.

MURPHY, J. D.; MCCARTHY, K. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. **Applied Energy**, v. 82, nº. 2, 2005.

MAIA, L. C.; CARVALHO JÚNIOR, A.A. Os fungos do Brasil. In: FORZZA, R. C. et al (Coord.). **Catálogo de plantas e fungos do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto de pesquisa jardim botânico do Rio de Janeiro, 2010. p. 43-48. Vol. 1.

MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, série didática. 2007.

MARTINEZ, A. T. et al. Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. **International Microbiology**, v. 8. 2005.

MARTINS, C. R. et al. Solubilidade de substâncias orgânicas. **Química Nova**. São Paulo. v. 36. 2013.

MATRICARDI, W. A. T. **Efeitos dos fatores do solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis* L. F.) cultivada na Grande Cáceres - Mato Grosso.** 135f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

MENEZES, C. R., BARRETO, A. R. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos por fungos basidiomicetos: Caracterização dos resíduos e estudo do complexo enzimático fúngico. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. Santa Maria, v. 19, nº. 2, 2015.

MILSTED, D. R. **Desenvolvimento de protótipo para estudo da higroscopia da madeira através de reconhecimento de imagem.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MONRROY, M. et al. Structural change in wood by brown rot fungi and effect on enzymatic hydrolysis. **Enzyme and Microbial Technology**. Elsevier. nº 49. 2011.

MORAES, A. M. L. et al. Micologia. In: MOLINARO, E. M. **Conceitos e métodos para a formação de profissionais em laboratórios de saúde.** Rio de Janeiro: Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio/Fundação Oswaldo Cruz. v 4. 2009.

MOREIRA, R. Y. O. et al. Antraquinonas e naftoquinonas do caule de um espécime de reflorestamento de *Tectona grandis* (Verbenaceae). **Brazilian Journal of Pharmacognosy**, v. 16, nº. 3, 2006.

MORESCHI, J. C. **Biodegradação e Preservação da Madeira.** Curitiba: Universidade Federal do Paraná, v. 1. 2013.

MOTTA, J. P. et al. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 43, nº 8. 2013.

MOTTA, J. P. **Propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* l.f. proveniente do vale do rio doce, Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Gerônimo Monteiro, 2011.

MOYA, R., BERROCAL, A. Wood color variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. **Annals of Forest Science**. Springer Paris, v. 67, 2009.

MURACE, M. et al. Anatomical changes in willow wood decayed by the brown rot fungus *Coriolellus malicola* (Basidiomycota). **Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica**. v. 41. 2006.

NADIR, N. et al. **Fungal pretreatment of lignocellulosic materials**. In: Biomass for Bioenergy - Recent Trends and Future Challenges. London: IntechOpen, 2019.

NAGADESI, P. K. et al. Delignification pattern of wood decay by white rot fungi in teak (*Tectona grandis* L. f.). **Journal of the Indian Academy of Wood Science**. Springer India, v. 10, nº 01. 2013.

NAGADESI, P. K. et al. Delignification of valuable timbers decayed by India Lignicolous fungi. **International Letters of Natural Sciences**. SciPress Ltd., v. 16. 2014.

NASCIMENTO, M. S. et al. **Phenolic extractives and natural resistance of wood**. In: Biodegradation. Life of Science. London: IntechOpen, 2013.

NISHIDA, T. et al. Lignin biodegradation by wood-rotting fungi, 1: Screening of lignin-degrading fungi. **Journal of the Japan Wood Research Society**. v. 34. 1988.

OLIVEIRA, A. M. F. et al. Agentes destruidores da madeira. In: LEPAGE, E. S. (Coord.) **Manual de Preservação de Madeiras**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. v.1. São Paulo, 1986.

ORLANDI, B. ***Oligoporus placentus***. Disponível em: <http://www.mycobank.org/BioloMICS.aspx?TargetKey=14682616000002126&Rec=5662>. Acesso em 05 de maio de 2016.

PAES, J. B. et al. Resistência natural de nove madeiras do semiárido brasileiro a fungos xilófagos em condições de laboratório. **Revista Árvore**. Viçosa, v. 28, nº 2. 2004.

PAES, J. B. et al. Resistência natural de sete madeiras a fungos e cupins xilófago Em condições de laboratório. **Revista Cerne**. Lavras, v. 13, nº 2. 2007.

PALA, H. Constituição e mecanismos de degradação biológica de um material orgânico: a madeira. **Construção Magazine**, n. 20. 2007.

PETTERSEN, R. C. **Chemical composition of wood**. Washington: American Chemical Society, 1984.

PINTO, M. L. **Propriedades e características da madeira de teca (*Tectona grandis*) em função da idade**. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2007.

PUBCHEM. **Naphtoquinone**. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=naphtoquinone>. Acesso em 15/12/2018.

PUBCHEM. **Tectoquinone**. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/#query=tectoquinone>. Acesso em 15/12/2018.

RANGANATHAN S. K.; KOSHI T.; SITARAMAN N. L. Methylanthraquinone (tectoquinone), a synergist for 2, 2-bis (p-chlorophenyl)-one, 1, 1-trichloroethane (DDT). **Nature**, nº 164, 1949.

RICCI, G. ***Gloeophyllum trabeum***. Disponível em: <http://www.mycobank.org/BioloMICS.aspx?TargetKey=14682616000002126&Rec=5590>. Acesso em 05 de maio de 2016.

RICHTER, H.G., DALLWITZ, M.J. 2000 onwards. **Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval**. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 25 th June 2009. Disponível em: <http://delta-intkey.com>. Acesso em 22 de out, 2016.

ROSALEM, G. **Resistência biológica da madeira de teca (*Tectona grandis*) A fungos xilófagos**. 25 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

ROWELL, R. M. **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

ROWELL, R. M., ROWELL, J. **Paper and Composites from Agro-Based Resources**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 1997.

RUDMAN P.; COSTA E. W. B. Relationship of tectoquinone to durability in *Tectona grandis*. **Nature**, nº 181. 1958.

SÁNCHEZ, C. Lignocellulosic residues: Biodegradation and bioconversion by fungi. **Biotechnology Advances**. Elsevier, v. 27. 2009

SANDERMANN W.; SIMATUPANG M. H. Zur chemie und biochemie des teakholzes (*Tectona grandis* L.). **Holz Roh-Werkst.** nº 24. 1966.

SANSIGOLO C. A.; SARTO C. Cinética da remoção dos extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante polpação Kraft. **Acta Scientiarum Technology**. Maringá, v. 32, nº 3, 2010.

SANTOS, C. P.; et al. Papel: como se fabrica? **Química Nova na Escola**. São Paulo, nº 14, 2001.

SANTOS, Z. M. **Avaliação da durabilidade natural da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill: Maiden em ensaios de laboratório**. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

SHIRKAVAND, E. et al. Pretreatment of radiata pine using two white rot fungal strains *Stereum hirsutum* and *Trametes versicolor*. **Energy Conversion and Management**. Elsevier. v. 142. 2017.

SHMIDT, O. **Wood and tree fungi: Biology, damage, protection and use**. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

SILVA, L. F. et al. Deterioração da madeira de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos. **Revista Cerne**. Lavras, v.20, nº.03. 2014.

SILVA, L. F. **Capacidade de deterioração de cepas de *Eucalyptus* spp. por fungos xilófagos**. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2011.

SILVA, M. R. **Determinação da permeabilidade em madeiras brasileiras de florestas plantadas**. 2007. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

SILVA, C. M. M. S. et al. Produção de enzimas ligninolíticas por fungos isolados de solos sob cultivo de arroz irrigado. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. **Embrapa Meio Ambiente**. Jaguariúna, 2004.

SILVA, M. N.; FERREIRA, V. F.; SOUZA, M. C. B. V. Um panorama atual da química e da farmacologia de naftoquinonas, com ênfase na β -Lapachona e derivados. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 3. 2003.

SJÖSTRÖM, E. **Wood chemistry: fundamentals and applications**. New York: Academic Press Inc., 1981.

SJÖSTRÖM, E.; ALÉN, R. **Analytical methods in wood chemistry, pulping, and papermaking**. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

SKYBA, O. et al. Syringyl-rich lignin renders poplars more resistant to degradation by wood decay fungi, **Applied and Environmental Microbiology**, v. 79, nº 8. 2013.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS (SNIF). **As florestas plantadas**. Serviço Florestal Brasileiro. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/component/content/article/106-florestas-e-recursos-florestais/florestas-plantadas/405-as-florestas-plantadas?Itemid=>. Acesso em: 20/07/2019.

TECHNICAL ASSOCIATION FOR THE WOLDWIDE PULP, PAPER AND CONVERTING INDUSTRY. **TAPPI 212 om-02**: One percent sodium hydroxide solubility of wood and pulp. Atlanta; 2002.

THULASIDAS, P. K.; BHAT, K. M. Chemical extractive compounds determining the brown rot decay resistance of teakwood. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 65, 2007.

TRABULSI, L. R. **Microbiologia**. 5. ed. São Paulo: Atheneu, 2008.

TSOUMIS, G. **Science and technology of wood**: structure, properties, utilization. New York: Chapman & Hall, 1991.

YELLE, D. J. et al. Multidimensional NMR analysis reveals truncated lignin structures in wood decayed by the brown rot basidiomycete *Postia placenta*. **Environmental Microbiology**. v.13, nº 4. National Agricultural Library. United States of America, 2011.

WEI, D. et al. Laccase and its role in production of extracellular reactive Oxygen species during wood decay by the brown rot basidiomycete *Postia placenta*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 76, nº 7. 2010.

WILCOX, W.W. Comparative morphology of early stages of brown-rot wood decay. **IAWA Journal**. Beijing. v. 14. 1993.

WOLFSMAYR U. J., TERZIEV N., DANIEL G. Natural durability and anatomical features of teak (*Tectona grandis*) from plantations in Costa Rica. In: IRG AMERICAS REGIONAL MEETING, 2008, Guanacaste. **International Research Group on Wood Protection**. Stockholm: 2008.

ZABEL, R. A.; MORRELL, J. J. **Wood Microbiology**: Decay and its Prevention. Califórnia: Academic Press, 1992.

ZHANG et al. Localizing gene regulation reveals a staggered wood decay mechanism for the brown rot fungus *Postia placenta*. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America – PNAS**. National Academy of Sciences, v. 113, nº 39. 2016.

ZIGLIO, A. C. **Uso da capsaicina como preservante de madeira ao ataque de fungo apodrecedor**. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos 2010.

**APÊNDICE A – RESUMO DAS ANÁLISES DE DADOS DA PERDA DE MASSA E
MASSA RESIDUAL DE MADEIRA DE *Tectona grandis* EM
FUNÇÃO DO TEMPO.**

**1 ANOVA para perda de massa e massa residual de madeira de cerne e alburno
de *Tectona grandis* em ensaio de biodeterioração acelerada**

TABELA 10 – ANOVA PARA PERDA DE MASSA DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM
ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	111,37699	55,68849	14,6649 **
Meses	3	2960,00701	986,66900	259,8282 **
Interação (fungos x meses)	6	76,71623	12,78604	3,3671 **
Tratamentos	11	3148,10023	286,19093	75,3652 **
Resíduo	348	1321,49154	3,79739	
Total	359	4469,59177		

FONTE: A Autora (2017)

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$).

TABELA 11 – ANOVA PARA PERDA DE MASSA DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	639,05201	319,52600	7,2781 **
Meses	3	24217,88014	8072,62671	183,8772 **
Interação (fungos x meses)	6	375,93889	62,65648	1,4272 ns
Tratamentos	11	25232,87104	2293,89737	52,2501 **
Resíduo	348	15277,98668	43,90226	
Total	359	40510,85772		

FONTE: A Autora (2017)

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). ns não significativo ($p \geq .05$)

TABELA 12 – ANOVA PARA MASSA RESIDUAL DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	111.37693	55.68846	14.6649 **
Meses	3	2960.00722	986.66907	259.8282 **
Interação (fungos x meses)	6	76.71619	12.78603	3.3671 **
Tratamentos	11	3148.10034	286.19094	75.3652 **
Resíduo	348	1321.49158	3.79739	
Total	359	4469.59192		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$).

TABELA 13 – ANOVA PARA MASSA RESIDUAL DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE DETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	639.05201	319.52600	7.2781 **
Meses	3	24217.87918	8072.62639	183.8772 **
Interação (fungos x meses)	6	375.93898	62.65650	1.4272 ns
Tratamentos	11	25232.87017	2293.89729	52.2501 **
Resíduo	348	15277.98748	43.90226	
Total	359	40510.85765		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$). ns não significativo ($p \geq .05$).

2 Perda de massa e massa residual média para madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* durante ensaio de biodeterioração acelerada em laboratório

TABELA 14 – PERDA DE MASSA PARA A MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* (%) EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

PERDA DE MASSA (%)				
Madeira de Cerne				
Fungos	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
<i>Trametes versicolor</i>	0,92 aC	5,19 aB	7,06 aA	8,30 bA
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,92 aD	5,12 aC	7,41 aB	10,18 aA
<i>Postia placenta</i>	1,04 aD	3,81 bC	5,68 bB	7,68 bA
Madeira de Alburno				
Fungos	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
<i>Trametes versicolor</i>	1,06	8,55	18,42	24,99
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	1,01	9,80	16,26	24,10
<i>Postia placenta</i>	1,10	6,97	13,00	19,96

FONTE: A autora (2018).

NOTA: Não foi aplicado o teste de comparação de médias para a madeira de alburno (F de interação não foi significativo). As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 15 – PERDA DE MASSA PARA A MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fator Fungo	
<i>Trametes versicolor</i>	13,25 a
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	12,81 a
<i>Postia placenta</i>	10,23 b
Fator tempo de deterioração acelerada	
30 dias	1,04 d
60 dias	8,44 c
90 dias	15,89 b
120 dias	23,01 a

FONTE: A autora (2017).

NOTA: Não foi aplicado o teste de comparação de médias (F de interação não foi significativo). As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

TABELA 16 – MASSA RESIDUAL MÉDIA PARA A MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* (%) EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

MASSA RESIDUAL (%)				
Madeira de Cerne				
Fungos	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
<i>Trametes versicolor</i>	99,08 aA	94,81 bB	92,94 bC	91,70 aC
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	99,08 aA	94,88 bB	92,59 bC	89,82 bD
<i>Postia placenta</i>	98,96 aA	96,19 aB	94,32 aC	92,32 aD
Madeira de Alburno				
Fungos	30 dias	60 dias	90 dias	120 dias
<i>Trametes versicolor</i>	98,94	91,45	81,58	75,01
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	98,99	90,20	83,74	75,90
<i>Postia placenta</i>	98,90	93,03	87,00	80,04

FONTE: A autora (2018).

NOTA: Colunas letras maiúsculas. Linhas letras minúsculas. As médias seguidas pelas mesmas letras não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Não foi aplicado o teste de comparação de médias para madeira de alburno (F de interação não foi significativo).

TABELA 17 – MASSA RESIDUAL MÉDIA PARA A MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fator Fungo	
<i>Trametes versicolor</i>	86.74 b
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	87.19 b
<i>Postia placenta</i>	89.77a
Fator tempo de deterioração acelerada	
30 dias	98,95 a
60 dias	91,56 b
90 dias	84,11 c
120 dias	76,99 d

FONTE: A autora (2017).

NOTA: Não foi aplicado o teste de comparação de médias (F de interação não foi significativo). As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3 Desvio padrão e coeficiente de variação de madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* para perda de massa e massa residual durante ensaio de biodeterioração acelerada

TABELA 18 – DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA PERDA DE MASSA DE MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Madeira de Cerne								
Fungos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
<i>Trametes versicolor</i>	0,15	16,64	1,18	24,15	0,72	11,77	1,45	17,98
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,05	4,58	1,58	20,75	3,06	21,52	4,16	17,97
<i>Postia placenta</i>	0,51	57,94	0,85	22,24	1,20	21,72	1,06	14,26
Madeira de Alburno								
Fungos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
<i>Trametes versicolor</i>	0,15	14,78	1,63	19,79	1,59	9,65	2,13	10,44
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,05	4,58	1,58	20,75	3,06	21,52	4,16	17,97
<i>Postia placenta</i>	0,07	6,36	3,50	55,21	2,39	18,60	3,97	19,26

FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: D.P. – Desvio padrão, C.V. – Coeficiente de variação.

TABELA 19 – DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA MASSA RESIDUAL MÉDIA DE MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Madeira de Cerne								
Fungos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
<i>Trametes versicolor</i>	0,15	0,16	1,18	1,24	0, 1,69	1,79	1,45	1,58
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,20	0,20	1,27	1,34	2,08	2,24	2,76	3,08
<i>Postia placenta</i>	0,51	0,52	0,85	0,88	1,20	1,27	1,06	1,14
Madeira de Alburno								
Fungos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
<i>Trametes versicolor</i>	0,15	0,15	1,66	1,80	1,59	1,91	2,13	2,67
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	0,05	0,05	1,58	1,72	3,06	3,56	4,16	5,42
<i>Postia placenta</i>	0,07	0,07	3,50	3,74	2,39	2,75	3,97	5,00

FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: D.P. – Desvio padrão, C.V. – Coeficiente de variação.

APÊNDICE B - RESUMO DAS ANÁLISES DE DADOS DA QUÍMICA DA MADEIRA DE *Tectona grandis* EM FUNÇÃO DO TEMPO

1 ANOVA para parâmetros químicos analisados em madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* em função do tempo

TABELA 20 – ANOVA PARA SOLUBILIDADE EM NaOH 1% DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	19,6628	9,8314	222,2978 **
Meses	4	240,7155	60,1788	1360,7001 **
Interação (fungos x meses)	8	238,4911	29,8114	674,0632 **
Tratamentos	14	498,8696	35,6335	805,7072 **
Resíduo	30	1,3267	0,04423	
Total	44	500,1964		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$).

TABELA 21 – ANOVA PARA SOLUBILIDADE EM NaOH 1% DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	362,6534	181,3267	45689,7258 **
Meses	4	1146,6727	286,6681	72233,0961 **
Interação (fungos x meses)	8	252,5396	31,5674	7954,1950 **
Tratamentos	14	1761,8658	125,8475	31710,3854 **
Resíduo	30	0,1190	0,0039	
Total	44	1761,9848		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

TABELA 22 – ANOVA PARA O TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	4,7280	2,3640	33,2858 **
Meses	4	57,5118	14,3779	202,4425 **
Interação (fungos x meses)	8	58,3405	7,2925	102,6797 **
Tratamentos	14	120,5804	8,6128	121,2699 **
Resíduo	30	2,1306	0,0710	
Total	44	122,7111		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

TABELA 23 – ANOVA PARA O TEOR DE EXTRATIVOS TOTAIS DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	19,1022	9,5511	12637,8289 **
Meses	4	227,7415	56,9353	75335,4276 **
Interação (fungos x meses)	8	73,9492	9,2436	12230,9611 **
Tratamentos	14	320,7929	22,9137	30318,9326 **
Resíduo	30	0,0226	0,0007	
Total	44	320,8156		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

TABELA 24 – ANOVA PARA O TEOR DE LIGNINA TOTAL DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	7,2316	3,6158	78,2917 **
Meses	4	98,9029	24,7257	535,3779 **
Interação (fungos x meses)	8	279,1991	34,8998	755,6756 **
Tratamentos	14	385,3336	27,5238	595,9643 **
Resíduo	30	1,3855	0,0461	
Total	44	386,7192		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

TABELA 25 – ANOVA PARA O TEOR DE LIGNINA TOTAL DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	6,2773	3,1386	35,4630 **
Meses	4	121,9212	30,4803	344,3881 **
Interação (fungos x meses)	8	223,3832	27,9229	315,4928 **
Tratamentos	14	351,5818	25,1129	283,7443 **
Resíduo	30	2,6551	0,0885	
Total	44	354,2370		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

TABELA 26 – ANOVA PARA O TEOR DE HOLOCELULOSE DE MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	1,7503	0,8751	18,9364 **
Meses	4	102,1783	25,5445	552,7273 **
Interação (fungos x meses)	8	264,7986	33,0998	716,2059 **
Tratamentos	14	368,7273	26,3376	569,8878 **
Resíduo	30	1,3864	0,0462	
Total	44	370,1137		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$).

TABELA 27 – ANOVA PARA O TEOR DE HOLOCELULOSE DE MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

Fonte de variação	Grau de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F
Fungos	2	42,1917	21,0958	238,3558 **
Meses	4	626,8695	156,7173	1770,7032 **
Interação (fungos x meses)	8	351,8656	43,9832	496,9532 **
Tratamentos	14	1020,9268	72,9233	823,9393 **
Resíduo	30	2,6551	0,0885	
Total	44	1023,5820		

FONTE: A Autora (2017).

**significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$).

2 Desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros químicos de madeira de cerne e alburno de *Tectona grandis* durante ensaio de biodeterioração acelerada em laboratório

TABELA 28 – DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA PARÂMETROS QUÍMICOS REALIZADOS EM MADEIRA DE CERNE E ALBURNO DE *Tectona grandis* SEM DETERIORAÇÃO

Parâmetros Químicos	Cerne		Alburno	
	D.P.	C.V.	D. P.	C. V.
NaOH 1%	0,47	2,68	0,04	0,24
Extrativos totais	0,01	0,15	0,03	0,39
Lignina total	0,35	0,98	0,66	1,83
Holocelulose	0,35	0,64	0,66	1,16

FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: D.P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação.

TABELA 29 – DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA PARÂMETROS QUÍMICOS REALIZADOS EM MADEIRA DE CERNE DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO POR 120 DIAS

MADEIRA DE CERNE								
<i>Trametes versicolor</i>								
Parâmetros Químicos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
NaOH 1%	0,02	0,10	0,04	0,20	0,02	0,13	0,03	0,17
Extrativos Totais	0,02	0,25	0,01	0,19	0,01	0,20	0,02	0,21
Lignina Total	0,04	0,11	0,01	0,03	0,05	0,14	0,04	0,12
Holocelulose	0,04	0,07	0,03	0,05	0,05	0,09	0,05	0,10
<i>Gloeophyllum trabeum</i>								
Parâmetros Químicos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
NaOH 1%	0,02	0,14	0,03	0,12	0,05	0,34	0,02	0,11
Extrativos Totais	0,05	0,86	0,02	0,22	0,03	0,39	0,04	0,35
Lignina Total	0,01	0,02	0,03	0,08	0,01	0,02	0,04	0,10
Holocelulose	0,01	0,02	0,03	0,05	0,01	0,02	0,04	0,08
<i>Postia placenta</i>								
Parâmetros Químicos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
NaOH 1%	0,01	0,08	0,02	0,10	0,03	0,12	0,06	0,29
Extrativos Totais	0,02	0,34	0,03	0,39	0,08	0,75	0,05	0,49
Lignina Total	0,55	1,51	0,03	0,07	0,06	0,14	0,05	0,12
Holocelulose	0,55	0,96	0,03	0,05	0,06	0,11	0,05	0,10

FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: D.P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação.

TABELA 30 – DESVIO PADRÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO PARA PARÂMETROS QUÍMICOS REALIZADOS EM MADEIRA DE ALBURNO DE *Tectona grandis* EM ENSAIO DE BIODETERIORAÇÃO ACELERADA EM LABORATÓRIO

MADEIRA DE ALBURNO								
<i>Trametes versicolor</i>								
Parâmetros Químicos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
NaOH 1%	0,02	0,15	0,04	0,20	0,14	0,69	0,01	0,06
Extrativos Totais	0,01	0,19	0,01	0,19	0,01	0,08	0,01	0,12
Lignina Total	0,04	0,10	0,03	0,06	0,01	0,04	0,04	0,12
Holocelulose	0,04	0,06	0,03	0,05	0,01	0,03	0,04	0,08
<i>Gloeophyllum trabeum</i>								
Parâmetros Químicos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
NaOH 1%	0,04	0,29	0,01	0,04	0,15	0,63	0,09	0,38
Extrativos Totais	0,01	0,14	0,04	0,57	0,03	0,50	0,04	0,35
Lignina Total	0,04	0,10	0,03	0,07	0,02	0,06	0,06	0,14
Holocelulose	0,04	0,07	0,03	0,05	0,02	0,04	0,06	0,12
<i>Postia placenta</i>								
Parâmetros Químicos	30 dias		60 dias		90 dias		120 dias	
	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.	D.P.	C.V.
NaOH 1%	0,01	0,07	0,02	0,05	0,01	0,05	0,04	0,11
Extrativos Totais	0,01	0,22	0,03	0,34	0,05	0,47	0,04	0,25
Lignina Total	0,03	0,08	0,05	0,13	0,04	0,09	0,06	0,14
Holocelulose	0,03	0,05	0,05	0,09	0,04	0,07	0,06	0,16

FONTE: A Autora (2017).

LEGENDA: D.P. – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação.